



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS MEDIANTE EL TRANSPORTE MARÍTIMO DE CORTA DISTANCIA

XAVIER AMETLLER MALFAZ

SERGI SAURÍ MARCHÁN

INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORT I TERRITORI

ENGINYERIA DEL TRANSPORT

BARCELONA, ABRIL 2007

OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS MEDIANTE EL TRANSPORTE MARÍTIMO DE CORTA DISTANCIA

AUTOR: XAVIER AMETLLER MALFAZ
TUTOR: SERGI SAURÍ MARCHÁN

RESUMEN

El tema que se plantea en el estudio es el de la distribución de mercancías mediante el Transporte Marítimo de Corta Distancia (TMCD). El actual desequilibrio entre modos de transporte en la distribución de mercancías entre países de la Unión Europea ha llevado a la saturación las infraestructuras de transporte terrestres, especialmente las carreteras. Por este motivo, resulta de vital importancia analizar distintas alternativas de transporte más sostenibles y que racionalicen el sector del transporte de mercancías permitiendo así un equilibrio entre los distintos agentes. En este sentido, el TMCD surge como un modo de transporte alternativo y complementario al terrestre que permite contribuir al desarrollo sostenible y económico de la Unión Europea.

El estudio realizado se dedica fundamentalmente a evaluar e identificar todos aquellos parámetros y variables más relevantes que permiten definir todo aquello relacionado con la cadena logística del TMCD.

En primer lugar, se enmarca el TMCD dentro del contexto de la política de transporte de la Unión Europea. La creciente dinamización del sector del transporte exige al transporte marítimo un esfuerzo de adaptación a los procesos de redistribución espacial de centros de producción y consumo y, como consecuencia de ello, de los flujos logísticos y de transporte.

Consecuentemente, en el estudio se ha desarrollado una metodología específica para modelizar todas las fases integradas en la cadena logística del TMCD con el objetivo de determinar los costes y tiempo de cada una de ellas, para su posterior implementación en un algoritmo de tipo heurístico de análisis de rutas.

Seguidamente se somete el algoritmo a un proceso de validación para determinar la coherencia de los resultados obtenidos contrastándolos con datos reales. Además, se desarrolla una metodología para la correcta definición de los distintos parámetros de entrada del algoritmo como la demanda de transporte de mercancías entre dos regiones concretas.

Finalmente, se realiza un valoración de las variables que inciden en el reparto modal de mercancías mediante el TMCD consistente en determinar cuáles son los parámetros decisivos para determinar bajo qué condiciones la solución intermodal representa una auténtica alternativa al transporte de mercancías puramente terrestre. Se analizan principalmente aquellas variables que decantan el equilibrio del reparto modal de mercancías hacia una solución de transporte u otra, para determinar, en última instancia, la potencialidad del TMCD para el transporte de mercancías.

Las conclusiones de la tesina se refieren, por una parte, a los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo diseñado para la distribución de mercancías en el problema tipo *many to many* planteado y, por otra, en aquellas variables que definen la cuota de mercado del TMCD en el reparto modal de mercancías. Asimismo, se aportan conclusiones sobre las emisiones de cada modo de transporte bajo distintos escenarios futuros de oferta de servicios TMCD.

Esta tesina pretende ser un punto de partida para el análisis de tráfico de TMCD para que, en futuros estudios, se pueda ampliar el alcance de la formulación empleada e incorporar variables estocásticas para modelar la demanda de transporte entre regiones. Además, el respeto por el medioambiente del transporte marítimo, en comparación con el terrestre, es un aspecto clave que en el futuro impulsará la redacción de estudios dedicados precisamente al análisis de la distribución modal de mercancías y la repercusión medioambiental de las distintas configuraciones de transporte posibles.

FREIGHT TRANSPORT OPTIMIZATION USING SHORT SEA SHIPPING (SSS)

AUTHOR: XAVIER AMETLLER MALFAZ
TUTOR: SERGI SAURÍ MARCHÁN

ABSTRACT

The subject considered in this study is the freight transport optimization using Short Sea Shipping (SSS). The increasing imbalance between road and maritime transport has led to saturation of the terrestrial infrastructures. For this reason, the development and analysis of a community transport especially sure and respectful with the environment is the first step to a more balanced growth of different modes of transport. In this sense, SSS rises like a real and efficient alternative to the land transport as well as integrated to a multimodal system door to door for the freight distribution.

The aim of the study is to evaluate and identify all those parameters required to determine the characteristics of the SSS under a theoretical approach.

The increasing growth of the transport market demands to the maritime transport an adaptation effort to the redistribution space processes of production centres and consumption and, as a result of it, of the logistic flows and transport. For this reason, a specific methodology has been developed to model all those phases integrated in the logistic chain of SSS. The final purpose is to determine costs and time of each one of them, for its later implementation in a heuristic algorithm of routing analysis.

Then, the algorithm has been submitted to a process of validation in order to check results in contrast to real data. Also, a specific methodology for the correct definition of the inputs of the heuristic algorithm is developed, such as the demand of goods of a region or the inventory cost of goods.

Finally, a sensitivity analysis of the main inputs of model is carried out to characterize the main parameters to determine under which conditions SSS represents an economical and a viable solution to growing surface freight transportation congestion problems. This investigation states an initial basis for evaluating the competitiveness of SSS concepts, and shows where market and environmental circumstances could be handled in order to enhance the competitiveness of SSS.

The conclusions refer to the factors that must be taken into account to contribute positively in the success of SSS. Some basic recommendations are suggested too in order to show that the competitiveness of the intermodal solution is a matter of public and private sectors.

On the other hand, a very interesting path to follow for future studies would be an extension of the formulation used and the introduction of new rules of design in the heuristic algorithm. Some likely next steps should be taken to determine how regional port systems might be formed and administrated, to quantify the economic development benefits that would accrue by SSS to both the private and public sectors, and to determine the level of landside transportation and marine port investments necessary to establish a balanced situation in the distribution of goods.

Índice general

1	Antecedentes y objetivos	3
1.1	Antecedentes.....	3
1.2	Enfoque metodológico.....	4
1.3	Objetivos del estudio	4
1.4	Estructura del documento	5
2	El Transporte Marítimo de Corta Distancia	6
2.1	Antecedentes del TMCD en la política europea de transporte	6
2.2	Concepto y marco general	8
2.3	Tráficos integrados en el Transporte Marítimo de Corta distancia	10
3	Modelización de la estructura de tiempos y costes de la cadena logística del TMCD.....	12
3.1	Antecedentes.....	12
3.2	Componentes de la cadena logística.....	13
3.3	Acarreos terrestres	15
3.3.1	Concepto y definición.....	15
3.3.2	Tiempo dedicado al acarreo terrestre.....	15
3.3.3	Coste unitario del tramo terrestre	17
3.3.4	Costes de inventario del tramo terrestre	19
3.4	La operativa portuaria del TMCD	20
3.4.1	Concepto y definición.....	20
3.4.2	Tiempo dedicado a la operativa portuaria	21
3.4.3	Coste de la operativa portuaria	26
3.5	Tramo marítimo.....	27
3.5.1	Concepto y definición.....	27
3.5.2	Coste del capital.....	27
3.5.3	Coste de reparaciones, mantenimiento, seguros y trámites administrativos	30
3.5.4	Coste de la tripulación	30
3.5.5	Coste del combustible.....	31
3.5.6	Coste de las tasas y tarifas portuarias	33
3.5.7	Costes de inventario	34
3.6	Resumen de la formulación empleada.....	36
3.6.1	Tabla de fórmulas obtenidas.....	36
3.6.2	Análisis de sensibilidad	37
4	Formulación y resolución del problema many to many	44
4.1	Antecedentes en el estudio de problemas routing	44
4.2	Justificación de la situación <i>many to many</i>	45
4.3	Aportaciones sobre el problema	45
4.4	Formulación del problema.....	46
4.5	Resolución del problema	50
5	Validación del modelo. Aplicación a un caso práctico	54
5.1	Rutas de Catalunya a Italia. Validación del modelo.....	54
5.1.1	El puerto de Barcelona y su hinterland. Elección de los orígenes.....	55
5.1.2	El puerto de Civitavecchia. Elección de los destinos	58
5.1.3	Determinación del flujo de mercancías. Matriz P_{ij}	59
5.1.4	Inputs del sistema Cataluña – Italia	62

5.1.5	Resultados de la validación	68
6	Valoración de la incidencia de las principales variables del modelo en la cuota de mercado del TMCD	76
6.1	Introducción y justificación del análisis	76
6.2	Rutas de España a Italia	76
6.2.1	Elección de los orígenes y destinos	76
6.2.2	Determinación del flujo de mercancías. Matriz P_{ij}	78
6.2.3	Inputs del sistema España e Italia	80
6.2.4	Análisis de resultados de las relaciones España e Italia	81
6.3	Análisis de sensibilidad del modelo	87
6.3.1	El acarreo y los costes en el TMCD	87
6.3.2	El tiempo en la cadena de TMCD	90
6.3.3	Potencialidad futura del TMCD	94
7	Conclusiones e investigaciones futuras	98
7.1	Conclusiones generales	98
7.2	Investigaciones futuras	99
8	Referencias bibliográficas	100
Anejo 1.	Código del programa VBA	103
Anejo 2.	Buques utilizados en el análisis	111

1 Antecedentes y objetivos

En este primer capítulo se realiza una breve introducción sobre el Transporte Marítimo de Corta Distancia, sus antecedentes más recientes y las principales características del estudio. Asimismo, se presentan el enfoque metodológico seguido, los objetivos del estudio y la estructura en la que se desarrolla la tesina.

1.1 Antecedentes

El presente estudio se centra en la distribución de mercancías mediante el Transporte Marítimo de Corta Distancia (en adelante, TMCD). El actual desequilibrio entre modos de transporte en la distribución de mercancías entre países de la Unión Europea está llevando a altas tasas de congestión a las infraestructuras de transporte terrestres. Por este motivo, resulta de vital importancia analizar distintas alternativas de transporte más sostenibles y que racionalicen el sector del transporte de mercancías, permitiendo así un equilibrio entre los distintos agentes. En este sentido, el TMCD surge como un modo de transporte alternativo y complementario al terrestre que permite contribuir al desarrollo sostenible y económico de la Unión Europea.

La cadena logística del TMCD integra tres componentes distintos en los que intervienen agentes diferentes en cada uno de ellos. El primero es conocido en el argot del transporte como acarreo terrestre. Es siempre la primera y última fase del transporte en la que el transportista realiza la carga de mercancía desde su origen al puerto origen y desde el puerto destino al destino final de la misma. La segunda fase del TMCD se desarrolla en la terminal portuaria donde se lleva a cabo el proceso de carga/descarga del buque y constituye el elemento de interconexión entre el lado terrestre y el marítimo de la cadena logística. Finalmente, el tercer componente de la cadena es el tramo marítimo donde el buque realiza el transporte de mercancías entre el puerto origen y el de destino.

La Política Común de Transporte Europea deja claro su apoyo al TMCD con el Libro Blanco *La política del transporte europeo de cara a 2010: la hora de la verdad*. En él se indica que las necesidades de reequilibrio del transporte pasan por la implantación de una competencia regulada y por la vinculación de los distintos modos de transporte. Para lograr este último objetivo, el documento destaca que es preciso garantizar entre el mar, las vías navegables y el ferrocarril una cadena logística eficiente y sostenible. El Libro Blanco propone impulsar la reactivación del transporte marítimo mediante la creación de las “autopistas del mar”, a modo de verdadera red de transeuropea marítima, que contará con el soporte especial del programa “Marco Polo” de apoyo al lanzamiento de iniciativas intermodales.

El análisis realizado intentará dar respuesta a muchas cuestiones que se plantean acerca la competitividad del TMCD con su competidor puramente terrestre, tales como aquellos factores que determinan la cuota de mercado de cada modo de transporte o los cuellos de botella que impiden el desarrollo del TMCD. Varios organismos de ámbito estatal como la Cambra de Comerç de Barcelona o Puertos del Estado han impulsado la redacción de varios documentos en los que se analiza la competitividad del TMCD. En estos documentos se ofrece

una visión práctica del TMCD con el objetivo de dar a conocer a los usuarios del TMCD (transportistas, transitarios, cargadores, etc.) las singularidades de este modo de transporte y sus casos de éxito para presentar el TMCD como una alternativa rentable, sostenible y moderna para el transporte de mercancías.

1.2 Enfoque metodológico

La metodología seguida se basa en el análisis de la cadena de TMCD desde la óptica de un sistema de distribución física de mercancías. Este tipo de análisis lleva siempre asociado la definición de una serie de componentes y una estrategia de distribución. En el caso que nos ocupa, los componentes del sistema son los camiones y/o buques que cubren respectivamente los lados terrestre y marítimo de la cadena, la mercancía que debe ser distribuida y unas instalaciones fijas. Cada uno de ellos lleva asociado una estructura de costes y tiempos que permiten evaluar la competitividad entre modos de transporte de mercancías. Por otra parte, en lo relativo a estrategia de distribución, se propone un modelo tipo *many to many* que permita obtener un óptimo global del sistema que distinga aquellas rutas en las que la mercancía será distribuida mediante TMCD de aquellas que lo hagan por el modo puramente terrestre.

Más concretamente, en la tesina se desarrolla la siguiente secuencia metodológica:

1. Diseñar una formulación que permita determinar los costes y tiempos asociados a la cadena de transporte intermodal TMCD y analizar detalladamente cada uno de sus componentes.
2. Formulación y optimización del problema *many to many* asociado a la distribución de mercancías. Determinación de aquellas rutas que optimizan el sistema de distribución de mercancías en términos de coste y de tiempo mediante las funciones determinadas en el punto anterior con objeto de modelizar la distribución modal del transporte de mercancías entre dos ámbitos geográficos.
3. Aplicación del modelo a un caso práctico para validar el algoritmo diseñado y contrastar los valores obtenidos con la realidad.
4. Valoración de la incidencia de las distintas variables que intervienen en la cadena de transporte TMCD para determinar la potencialidad de este modo de transporte para la distribución modal de mercancías.
5. Cuantificación de la cuota de mercado lograda o perdida con el TMCD según los valores adoptados para las principales variables que intervienen en el reparto modal de mercancías.

1.3 Objetivos del estudio

El presente estudio tiene como principal objetivo cuantificar la potencialidad de la cadena de transporte intermodal TMCD frente al transporte puro por carretera. Más concretamente, el estudio se dedica fundamentalmente a evaluar e identificar todos aquellos parámetros y

variables más relevantes que permiten definir todo aquello relacionado con la cadena logística del TMCD a través del desarrollo de los siguientes puntos:

1. Desarrollar una metodología específica para determinar todos aquellos costes y tiempos en los que incurre el TMCD, tarea que representa el primer eslabón para la posterior implementación de las funciones de coste y tiempo en un algoritmo de tipo heurístico.
2. El análisis de rutas que se realiza mediante el planteamiento de un problema *many to many* resuelto mediante un algoritmo en el que se introducen criterios de decisión económicos y otros relacionados con el tiempo de tránsito de las mercancías. Esta herramienta es la que ha permitido la obtención de los resultados más relevantes del presente estudio.

1.4 Estructura del documento

El presente estudio se ha estructurado en los siguientes puntos:

- En primer lugar se realiza una descripción de lo que se conoce actualmente como TMCD, sus antecedentes y los tráficos que integra.
- En el tercer capítulo se desarrolla una metodología para definir la estructura de costes y tiempo asociada a la cadena de transporte intermodal de TMCD. Asimismo, se realiza un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que intervienen en la definición del modelo para determinar los costes del transporte.
- El siguiente capítulo consiste en la formulación, optimización y resolución del problema *many to many* de distribución de mercancías.
- Seguidamente, en el cuarto capítulo, se procede a la aplicación del modelo en un caso práctico para su validación.
- Y, finalmente, se realiza una valoración de la incidencia de las principales variables que intervienen en la cuota de reparto de mercancías del TMCD y se extraen las conclusiones del estudio.

La estructura propuesta permitirá seguir adecuadamente todo el proceso que ha permitido, en primer lugar, conocer el TMCD y sus antecedentes, la obtención de las funciones de costes y tiempos del mismo, su implementación en un algoritmo heurístico y, finalmente, validar el modelo propuesto y analizar la potencialidad futura del TMCD.

2 El Transporte Marítimo de Corta Distancia

En este capítulo se describen las principales características del TMCD así como sus antecedentes en la política de transportes de la Unión Europea. Se realiza un recorrido cronológico por las distintas comunicaciones y publicaciones europeas sobre el TMCD para dejar constancia de la voluntad política existente en la promoción de este tipo de transporte intermodal. A pesar de que alguno de los agentes que integran la cadena logística del TMCD expresan en la actualidad un notable grado de desconocimiento sobre las peculiaridades de este modo de transporte (en especial todo lo referente a legislación vigente y documentación necesaria por parte de los transportistas terrestres) destaca el esfuerzo realizado por parte de la UE y de ciertas organizaciones españolas en la difusión y promoción del TMCD.

2.1 Antecedentes del TMCD en la política europea de transporte

La Política Común de Transporte Europea tiene como principal objetivo el logro de una movilidad segura y sostenible y que permita el diseño de redes de transporte puerta a puerta sobre la base de integración y cohesión del mercado interior Europeo.

En materia de transporte marítimo, el esfuerzo liberalizador iniciado en los años 80 generó una corriente de interés hacia las posibilidades de este modo de transporte. Así, a finales de la década de los 80, varias asociaciones de empresarios de países centroeuropeos, fundamentalmente de Holanda y la República Federal Alemana, se integraron en la Asociación Naviera Europea (*European Community Shipowners Associations*, ECSA) cuyo ámbito de negocio se limitaba a los servicios marítimos de corta distancia. De esta manera se creó el denominado “*Grupo de trabajo para el tráfico de corta distancia*”.

La creciente dinamización del sector del transporte exigía al transporte marítimo un esfuerzo de adaptación a los procesos de redistribución espacial de centros de producción y consumo y, como consecuencia de ello, de los flujos logísticos y de transporte. El reto era lograr un óptimo control y planificación de las cadenas logísticas de aprovisionamiento y distribución por parte de los agentes que intervienen en los diversos modos de transporte, con una preponderancia muy clara del transporte terrestre.

En 1992, y por iniciativa principalmente del entonces Comisario de Industria, Martin Bangeman, la Comisión Europea publicó una comunicación titulada *Nuevos retos para las industrias marítimas*, que trajo como consecuencia la creación del llamado Foro de las Industrias Marítimas (*Maritime Industries Forum*, MIF), que acoge a navieros, puertos, astilleros y sus industrias auxiliares, pesca, etc., así como a la Comisión Europea y a representantes de los gobiernos de los Estados miembros. El primer informe de este Foro se presentó en octubre de 1992 y las primeras recomendaciones fueron precisamente promover el transporte marítimo de corta distancia y multimodal, incluyendo los problemas que dificultan el uso del transporte marítimo como alternativa o complemento al transporte puro por carretera y aquellos relativos al desarrollo de servicios marítimos rápidos. Como consecuencia, el MIF acordó crear un Panel sobre TMCD, que presentó su primer informe en junio de 1993.

La Comisión Europea, a través de la Dirección General responsable de Transportes, presentó en 1995 una comunicación con el título *El desarrollo del transporte marítimo de corta distancia en Europa: perspectivas y desafíos* en la que se subraya la necesidad de mejorar la eficiencia portuaria como medida clave para el desarrollo del TMCD tal y como ya había indicado en el Libro Blanco sobre el curso futuro de la política común de transportes.

Desde el punto de vista económico, la Comisión ha venido convocando programas de ayuda denominados *Acciones Piloto en el Ámbito del Transporte Combinado* (PACT) para el desarrollo de iniciativas innovadoras que se traduzcan en potenciar el reequilibrio de cargas desde la carretera a otros modos de transporte como el TMCD.

Paralelamente a la formulación de medidas concretas, la Comisión Europea preparó dos comunicaciones relacionadas con el desarrollo del Transporte Marítimo de Corta Distancia:

- *Libro Verde: hacia una tarificación equitativa y eficaz del transporte.* Opciones para la internalización de los costes externos del transporte marítimo en la Unión Europea.
- *Libro Blanco: tarifas justas por el uso de infraestructuras.* Estrategia gradual para un marco común de las infraestructuras en la Unión Europea.

Por su parte, en materia estrictamente portuaria, la Comisión Europea edita en octubre de 1997 el *Libro Verde de los Puertos e Infraestructuras Marítimas* en el que se dedica un apartado especial al TMCD que resulta de vital importancia como modo alternativo al transporte de carretera.

En 1999, la Comisión publica su segundo monográfico acerca el TMCD en el que se delimita el ámbito geográfico de este tipo de transporte y se diagnostica la situación actual, resaltando las ventajas competitivas y poniendo de relieve los principales obstáculos para su desarrollo. También se considera esencial que este tipo de transporte ofrezca soluciones globales de transporte puerta a puerta, con un alto nivel de calidad, regularidad y frecuencia en un entorno logístico personalizado y unos costes atractivos.

En este contexto de medidas concretas, la Comisión propuso que los Estados miembros designaran un enlace nacional (*Focus Point*) en materia de Transporte Marítimo de Corta Distancia. La labor principal de estos enlaces es proporcionar todos los agentes interesados la información y normativa necesaria que aquellos pidieran. De este modo, la Comisión, en reuniones con los mencionados enlaces, coordina y armoniza las medidas de promoción y desarrollo del TMCD. Igualmente, la Comisión ha recomendado el establecimiento de una oficina de promoción del TMCD en cada uno de los Estados miembros. En España, y a iniciativa de Puertos del Estado y de la Dirección General de la Marina Mercante del Ministerio de Fomento, la oficina con nombre *Asociación Española de Promoción del Transporte Marítimo de Corta Distancia* está ya constituida con una participación privada del 50%.

El refuerzo del TMCD queda definitivamente respaldado con el Libro Blanco *La política del transporte europeo de cara la 2010: la hora de la verdad* (2001). En él, se indica que las necesidades de reequilibrio del transporte pasan por la implantación de una competencia regulada y por la vinculación de los distintos modos de transporte. Para lograr este último objetivo, el documento destaca que es preciso garantizar entre el mar, las vías navegables y el

ferrocarril una cadena logística eficiente y sostenible. El Libro Blanco propone impulsar la reactivación del transporte marítimo mediante la creación de las “autopistas del mar”, a modo de verdadera red de transeuropea marítima, que contará con el soporte especial del programa “Marco Polo” de apoyo al lanzamiento de iniciativas intermodales.

En enero de 2003, la Comisión Europea organizó un seminario sobre las autopistas marítimas que permitió definir varias de sus funciones:

- Asegurar la interconexión entre las regiones y las conexiones periféricas.
- Evitar los cuellos de botella.
- Garantizar la accesibilidad de la Unión Europea y de los mercados mundiales.

Según el informe Van Miert, expuesto el junio de 2003, la función de una verdadera autopista del mar consiste en reemplazar a las autopistas terrestres, ya sea para evitar la saturación actual de los corredores terrestres o bien para acceder a países separados del resto de la Unión Europea por mar. El mismo informe afirma que es de capital importancia para Europa que las conexiones potencialmente más prometedoras gocen de ayuda pública en su fase de lanzamiento, como subraya el Libro Blanco sobre la política de Transportes, es decir, otorgarles un distintivo reconocible y fomentar su despegue.

En la actualidad, numerosas Autoridades Portuarias y Cámaras de Comercio de distintas comunidades autónomas dedican esfuerzos y dinero en la promoción y desarrollo del TMCD. Los principales objetivos de los estudios sobre el TMCD que se realizan actualmente están orientados a identificar y analizar los distintos problemas y obstáculos que puedan afectar las condiciones de competitividad del TMCD, con el fin de encontrar soluciones y aportar informes y análisis a las empresas y administraciones para facilitar y estimular la toma de decisiones a favor de esta solución de transporte intermodal. Entre estos estudios destacan el *Tipología y volumen de mercancías captables por el TMCD* (Cambra de Comerç de Barcelona, 2005) y *Promoción del short sea shipping en el arco Atlántico* (Puertos del Estado, 2005).

2.2 Concepto y marco general

La Comisión propuso una definición operativa de transporte marítimo de corta distancia en su comunicación acerca de *El desarrollo del transporte marítimo de corta distancia en Europa* como “el transporte por mar de mercancías y pasajeros entre puertos situados geográficamente en Europa o entre dichos puertos y puertos situados en países no europeos ribereños de los mares cerrados que rodean Europa”.

De acuerdo con esta definición, el ámbito geográfico del TMCD supera al del transporte que se realiza entre puertos situados en Estados miembros de la Unión Europea. En particular, el TMCD se extiende también al transporte internacional entre puertos de los Estados miembros entre orígenes y destinos finales de la Unión Europea y de otros Estados situados en el Mediterráneo, el Mar Negro, el Mar Báltico y puertos de Noruega e Islandia.

Sin embargo, la definición anterior tal y como la plantea la Comisión se considera limitada al centrarse únicamente en el ámbito geográfico. El concepto de TMCD nace además con una clara vocación intermodal, en el sentido que se integra necesariamente con el transporte

terrestre (carretera y ferrocarril) para atender los desplazamientos de viajeros y mercancías entre orígenes y destinos finales.

Por lo tanto, desde el punto de vista del presente estudio, el transporte marítimo de corta distancia se basará en la complementariedad del modo de transporte marítimo y terrestre, y no necesariamente en la sustitución entre modos. Su desarrollo implica favorecer la integración de los distintos modos de transporte a través de la interconexión de las redes de transporte marítima y terrestre.

En los actuales mercados del transporte, la oferta debe orientarse a satisfacer los requerimientos de la demanda, esto es, los servicios han de ser “puerta a puerta”, de bajo coste, rápidos, regulares, fiables, seguros, flexibles y transparentes. Con estas premisas, la competencia no se da entre modos de transporte sino entre cadenas de transporte ya sean unimodales (carretera), intermodales terrestres (carretera-ferrocarril) o intermodales marítimo-terrestres.

El TMCD forma parte de las cadenas marítimo-terrestres y su competitividad depende de la eficacia y eficiencia con que se integran todos sus modos y nodos de la cadena, de forma que cubran satisfactoriamente los niveles de calidad y precio que impone la demanda de transporte.

La calidad del servicio debe asegurarse a lo largo de toda la cadena de transporte. En consecuencia, y por su propia naturaleza, el TMCD requiere para su desarrollo compatibilizar al máximo las infraestructuras, el material móvil, los servicios, y los sistemas de información y contratación del transporte marítimo y del terrestre.

Pero además, interesa considerar el concepto de TMCD como aquél que forma parte de cadenas marítimo-terrestres que compiten o pueden competir con otras cadenas exclusivamente terrestres. Para ello, la cadena marítimo-terrestre en la que se apoya, no solamente debe poseer condiciones adecuadas de oferta (calidad y precio), sino que además deben existir cadenas alternativas razonables de transporte terrestre, ferroviario y/o por carretera.

En consecuencia, el concepto de TMCD en Europa se basa también en la competencia entre las cadenas marítimo-terrestres y las exclusivamente terrestres. Su desarrollo implica favorecer el desarrollo de una oferta para las primeras de forma que puedan competir razonablemente con las segundas, siempre que aparezcan las oportunas condiciones físicas y de mercado.

El Libro Blanco del Transporte en Europa da un novedoso impulso a las “autopistas del mar” como base para la configuración de una futura red transeuropea marítima. En consecuencia, las “autopistas del mar” surge como reflejo, en el lado marítimo, de las redes transeuropeas terrestres ya definidas. El objetivo es lograr que las cadenas intermodales marítimo-terrestres sean eficientes y rentables y que puedan competir en igualdad de condiciones con otras cadenas de transporte terrestre.

2.3 Tráficos integrados en el Transporte Marítimo de Corta distancia

Teniendo en cuenta la visión intermodal de las cadenas de transporte planteada anteriormente, el TMCD integraría principalmente los siguientes tipos de tráfico:

- Tráficos de transbordo por rodadura (Ro-Ro o “*Roll on-Roll off*”). Se trata de un tipo de tráfico muy adecuados para el TMCD al garantizar un alto nivel de eficiencia en la prestación de servicios portuarios y minimizar con ello los costes y tiempos de tránsito de la mercancía a su paso por el puerto.
- Tráficos servidos por operativas portuarias tradicionales (Lo-Lo o “*Lift on-Lift off*”). Se refiere, principalmente, al tráfico de contenedores, igualmente muy adecuados para el transporte intermodal, aunque precisan de operativa y equipamiento más específicas para realizar un cambio de modo eficaz.
- Existen, además, múltiples alternativas que combinan pasajeros y mercancías (*Ro-pax*), con conductores (*Ro-driver*), buques para el transporte de coches (*PCC*) y de coches y camiones (*PCTC*), amén de las versiones en alta velocidad (*fast ferry*) cuya capacidad de carga es más limitada.

El TMCD, como se ha podido comprobar, no está necesariamente asociado a tráfico de mercancía general, sino que debe estar abierto al tráfico de graneles sólidos y líquidos con suficiente masa crítica y regularidad. Asimismo, el TMCD no debe estar vinculado únicamente al transporte de mercancías, sino también al de pasajeros al existir un régimen claro de competencia con otros modos de transporte.

Sea cual sea la modalidad de carga o buque, también es necesario incluir en el concepto de TMCD los servicios auxiliares de distribución regional de cargas de transporte oceánico, atendidos por buques de enlace tipo “*feeder*”, cuyo transporte se realiza entre puertos o terminales centro “*hub*” y otros puertos de Europa o de países limítrofes o próximos, dado que es posible encontrar situaciones de competencia entre el tramo marítimo atendido por el buque de enlace y cadenas alternativas de transporte terrestre.

En el presente estudio únicamente se analizan los tráfico de transbordo por rodadura ro-ro al presentar estos las siguientes ventajas:

- Son los tráfico más fácilmente accesibles, idóneos para desarrollar el TMCD en una primera fase de promoción.
- Necesidad de salidas regulares y muy continuas que permitan transportar las mercancías de forma ágil y rápida.
- Flexibilidad en la carga y descarga de mercancías, a pesar de la inestabilidad del sector de estibadores.
- Rápida adaptación de las infraestructuras portuarias a este tipo de tráfico ya que, esencialmente, sólo requiere de muelles que dispongan de amplias superficies de almacenamiento, rampas ro-ro y una buena accesibilidad por carretera y, si es posible, por ferrocarril.

En posteriores trabajos se podrían analizar los demás tráficos mencionados así como analizar las potencialidades del tráfico de mercancía contenerizada integrada en tráficos TMCD.

3 Modelización de la estructura de tiempos y costes de la cadena logística del TMCD

En este capítulo se determinan todas aquellas funciones que modelizan el tiempo y coste de las distintas fases integradas en la cadena logística del TMCD. En cada uno de los apartados se realiza una descripción de la metodología seguida para determinar las funciones así como los datos y fuentes de información consultadas para dicho acometido. Como introducción al capítulo, se realiza una revisión del estado del arte de las funciones de coste en el ámbito marítimo.

3.1 Antecedentes

Como se detallaba en la metodología propuesta para la realización de este estudio en el primer capítulo, la determinación de funciones de coste para describir un determinado proceso es clave para analizar la potencialidad del mismo y detectar en qué parámetros y/o variables hay que incidir para reducir costes y tiempo. Por este motivo, en este apartado se repasan los principales trabajos realizados en esta línea con el objetivo de situar la metodología propuesta en el marco de la determinación de funciones de coste en ámbito marítimo.

En la línea de planificar y orientar la inversión futura se realizaron los primeros trabajos que analizan la estructura de costes y de producción de los puertos. La estimación empírica de funciones de costes portuarias tiene su origen en la década de los años setenta con el trabajo de Wanhill (1974), cuyo objetivo era diseñar un modelo que permitiera determinar el número de atraques óptimos que minimizara el coste total de uso del puerto, entendiendo como tal la suma de dos componentes: el coste de suministrar la infraestructura (el atraque) y el coste del tiempo del barco en el puerto. En el trabajo de Wanhill (1974) se considera que la inversión y planificación futuras han de hacerse teniendo en cuenta que los servicios portuarios no se pueden almacenar y, por tanto, hay un *trade-off* entre el coste de la capacidad portuaria y el coste de permanencia de los barcos en el puerto (tiempo de servicio más tiempo de espera), que es determinante y ha de ser tenido en cuenta en el proceso de planificación.

En la misma línea que el trabajo de Wanhill está el manual de planificación para los países en desarrollo preparado por la Secretaria de la UNCTAD en 1978. En este trabajo se utiliza el método de simulación de Montecarlo para desarrollar una metodología que permita calcular los costes de diversos tipos de terminales en función de las características de la terminal y del tiempo de permanencia de los buques en el puerto. La idea es que los planificadores portuarios han de tener presente que la planificación exclusivamente encaminada a reducir al mínimo los costes portuarios en sentido estricto, esto es, sin considerar el tiempo de espera de los barcos, proporcionará generalmente un nivel de servicio poco satisfactorio que puede conducir a la imposición de recargos por congestión y que no será económicamente aceptable. Al mismo tiempo, este trabajo señala la dificultad de medir el rendimiento de las terminales portuarias a partir de los datos que están disponibles en las memorias de los puertos y defiende que para analizar el crecimiento de la productividad, las economías de escala y el cambio técnico es fundamental realizar estimaciones de la correspondiente función de producción o de coste.

La rama de la literatura interesada en la planificación óptima de puertos o terminales portuarias que se inicia con los dos trabajos mencionados continúa con los trabajos de Janson y Sheneerson (1982), Sheneerson (1981, 1983), Janson (1984), y Fernández et al. (1999). Todos los trabajos mencionados consideran que la utilización óptima de un puesto de atraque se obtiene minimizando la suma del coste portuario en sentido estricto y del coste del tiempo de permanencia del buque en el puerto. Por esta razón en todos estos estudios la forma básica de función de producción de servicios portuarios escogida es el modelo de colas, al tiempo que se asume que la llegada de los barcos es aleatoria y sigue una función de distribución de Poisson y que los tiempos de servicio siguen una distribución exponencial. La principal crítica que se ha realizado a este tipo de modelos que suman los costes de usuarios y operarios es que el tiempo del buque es introducido como un factor productivo en la función de costes del puerto cuando, según Hooper (1985), es más apropiado considerarlo un componente del producto que representa la calidad del servicio.

Por otra parte, el análisis de los costes permite realizar evaluaciones del rendimiento y la productividad de los puertos a través del cálculo de diversos indicadores, como en los trabajos de De Monie (1989), Dowd y Lechines (1990), Talley (1994) y Conforti (1992); así como realizar comparaciones de la eficiencia productiva entre empresas y a lo largo del tiempo para una misma empresa. En esta última línea además de los trabajos clásicos que consideran que las empresas están minimizando costes, aparece una nueva rama de investigación en la literatura que permite analizar situaciones en que este supuesto se rompe y, por tanto, se admite la posibilidad de que las empresas sean ineficientes. Existen dos técnicas que permiten llevar a cabo este tipo de estudios: el *Data Envelopment Analysis* (Roll y Hayuth, 1993; Martínez Budría et al., 1999 y Tongzon, 2001) y la estimación econométrica de funciones frontera y distancia (Liu, 1995 y Baños-Pino et al., 1999).

El *Data Envelopment Analysis* (DEA) y la estimación de funciones frontera son dos métodos alternativos para estimar funciones frontera y por tanto medir la eficiencia en la producción y en los costes. Ambas técnicas permiten derivar ratios de eficiencia relativa dentro de un conjunto de unidades analizadas, de modo que la eficiencia de las unidades es comparada con una envolvente de eficiencia. Sin embargo, mientras que la estimación de funciones frontera supone el uso de métodos econométricos, el DEA es una técnica no paramétrica basada en la programación lineal.

En el presente estudio, las funciones de coste que se determinan tratan de representar el coste de la cadena logística del transporte desde la óptica del transportista terrestre. Como se detallará en apartados posteriores, se ha modelizado cada una de las componentes de la cadena logística del TMCD (acarreo terrestres, operativa portuaria y tramo marítimo) para representar el coste total del transporte y compararlo con la alternativa puramente terrestre.

3.2 Componentes de la cadena logística

Para crear un modelo matemático de comportamiento de un determinado sistema de distribución de mercancías es necesario conocer detalladamente las características del mismo. Generalmente y como sucede en este caso, los sistemas reales son complejos y para representarlos matemáticamente y de una manera clara y sencilla resulta necesaria una simplificación del sistema.

El objetivo del presente epígrafe es modelizar la cadena del transporte para luego asignar los costes derivados de cada una de las partes o componentes de la cadena logística. En este sentido, los conceptos estudiados son:

- **Acarreos terrestres.** Se trata de la acción de transportar una mercancía de un origen a un destino. En la modelización propuesta, el acarreo terrestre lo realizará una cabeza tractora acompañada de un semirremolque, tanto en origen como en destino. Siempre será el inicio y el fin de la cadena logística del TMCD.
- **Operativa portuaria.** Es el punto de interconexión entre el lado terrestre y el lado marítimo de la cadena logística del TMCD. Aquí es donde se realiza el proceso de carga y/o descarga del buque ro-ro.



Figura 3-1. Operativa portuaria en el muelle Andalusia del puerto de Tarragona.

- **Tramo marítimo.** Es el tramo exclusivamente marítimo de la cadena del transporte donde el buque cubre la distancia entre el puerto origen y destino.

Para cada uno de estos conceptos se desarrollará una metodología específica que permita determinar la estructura de costes y tiempo asociada a cada tramo de la cadena logística. Cada una de ellas tiene sus particularidades y condiciones específicas que determinan las posibilidades de negocio y beneficio de una cadena de transporte multimodal como el TMCD respecto al transporte puro por carretera. En este punto es necesario incidir en que el caso que se analiza en el estudio consiste en aquella cadena logística de TMCD en la que el conductor de camión que realiza el acarreo terrestre en origen o destino no viaja en el buque durante el tramo marítimo. Este caso es el que plantea mayores posibilidades de éxito frente al transporte puro por carretera ya que, al no acompañar la mercancía durante la fase marítima, el conductor del camión puede realizar actividades paralelas que incrementan la productividad de la empresa de transporte y disminuyen los costes de operación. Para asegurar esta cadena de TMCD, es necesario que exista un contacto comercial en el país de destino que cubra la última fase de acarreo terrestre.

3.3 Acarreos terrestres

3.3.1 Concepto y definición

El transporte por carretera suele ser la primera y la última etapa del viaje de una mercancía. En el argot del transporte, se conoce como acarreo la acción de transportar una mercancía. El TMCD necesita siempre de esta componente del transporte debido a que el origen y destino de las mercancías no coincide, en la mayoría de los casos, con la ubicación exacta de la terminal portuaria. En este punto concreto, las zonas de actividades logísticas (ZAL) de los puertos tienen un papel importante en lo que se refiere a actuar como auténticas terminales de consolidación de las mercancías y proveer todos aquellos servicios necesarios para el transporte.

Por otra parte, la tendencia actual en la planificación de la mayoría de los puertos nacionales es la de potenciar la conexión de los mismos a la red ferroviaria. En el futuro, se prevé que este modo de transporte juegue un papel importante en este tramo del viaje conocido como acarreo. No obstante, las deficiencias en infraestructuras y en la explotación hacen que el modo de transporte mayoritario del acarreo sea, a día de hoy, la carretera pura.

3.3.2 Tiempo dedicado al acarreo terrestre

El tiempo que supone el acarreo en el TMCD depende fundamentalmente de los descansos obligatorios a los que se deben someter los transportistas terrestres. En el presente estudio, se ha considerado que los conductores respetan escrupulosamente la legislación referente a los descansos de circulación en el transporte de mercancías por carretera, considerando los descansos diarios, y los días máximos consecutivos de circulación: cinco (5) días en total, en dos (2) de ellos podrán conducir 10 horas y los otros tres (3) días 9 horas; sumando un total de 47 horas de circulación semanal.

Como se puede observar en la Figura 3-2 el tiempo total de trayecto terrestre T_{ij}^t es la suma del tiempo real de conducción T_{ij}^{rc} y los descansos obligatorios t_d , tal y como se indica en la expresión (3-1).

$$T_{ij}^t = T_{ij}^{rc} + t_d \quad (3-1)$$

Los tiempos de descanso son distintos en función de las horas acumuladas de conducción, por lo que en el presente estudio se ha simplificado esta circunstancia expresando de forma lineal el tiempo total T_{ij}^t con el tiempo real de conducción T_{ij}^{rc} , obteniendo éste último como el cociente de la distancia entre dos puntos d_{ij} y la velocidad promedio v_p .

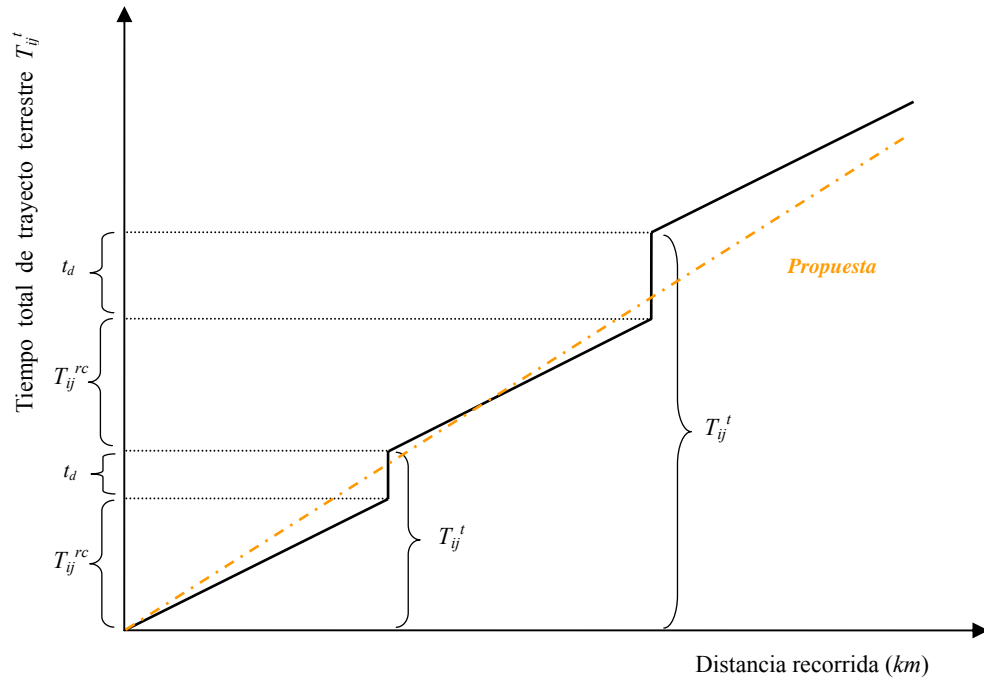


Figura 3-2. Esquema del efecto de los descansos obligatorios en la distancia recorrida.

Aplicando la reglamentación relativa a la ordenación del tiempo de trabajo de las personas que realizan actividades móviles de transporte por carretera (Reglamentación europea 2002/15/CE), que fija los descansos obligatorios a los que están obligados los chóferes de los camiones, se puede obtener, como se comentaba anteriormente, una función que relacione el tiempo real de conducción T_{rc} con el tiempo total de trayecto terrestre, T_t . En la relación (3-2) se ha considerado un tiempo adicional total de 3 horas para cada trayecto, que representa el tiempo dedicado a la carga y descarga de mercancía en origen y destino.

$$T_{ij}^t = 1,907 T_{ij}^{rc} \quad r^2 = 0,98 \quad (3-2)$$

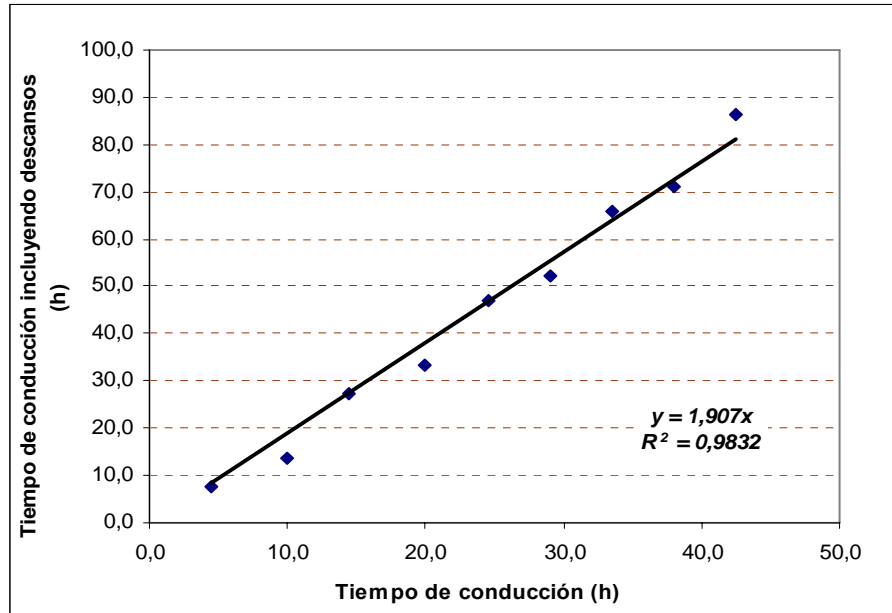


Figura 3-3. Relación entre el tiempo de conducción y el tiempo de conducción incluyendo el descanso obligatorio. Fuente: Directiva 2002/15/CE.

De esta manera, considerando una velocidad promedio v_p de 72 km/h¹, se obtiene el tiempo asociado al tramo terrestre de la cadena (en horas), en función de la distancia, como indica la expresión (3-3).

$$T_{ij}^t = 1,907 T_{ij}^{rc} = 1,907 \frac{d_{ij}}{v_p} = 0,0265 d_{ij} \quad (3-3)$$

donde,

d_{ij} = distancia directa terrestre entre el origen i y el destino j (km)
 v_p = velocidad promedio del camión de 72 km/h

3.3.3 Coste unitario del tramo terrestre

Una vez establecido el tiempo dedicado al tramo terrestre se trata ahora de asignar los costes asociados al mismo. Un aspecto muy importante a tener en cuenta para determinar la estructura de costes de un modo de transporte es el de distinguir aquellos costes vinculados al tiempo de los que dependen directamente de la distancia recorrida. De esta manera, y acorde con el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera* (Ministerio de Fomento, 2006), se han dividido los costes en dos tipologías específicas: los costes del tiempo y los costes kilométricos:

- Costes del tiempo:

¹ La velocidad promedio considerada corresponde a la velocidad media de un conjunto de relaciones entre distintos pares origen/destino entre España e Italia. Fuente: www.mappy.com.

- Amortización de la cabeza tractora y el semirremolque
- Financiación de la cabeza tractora y el semirremolque
- Nómina del personal de conducción
- Seguros del vehículo
- Costes fiscales
- Dietas
- Costes kilométricos:
 - Combustible
 - Neumáticos
 - Mantenimiento
 - Reparaciones

En la Tabla 3-1 se detalla el porcentaje al coste total unitario de cada uno de los costes presentados:

Concepto	Porcentaje del coste unitario del tramo terrestre
Amortización	12,53%
Financiación	1,92%
Personal de conducción	23,57%
Seguros del vehículo	5,87%
Costes fiscales	0,78%
Dietas	11,60%
Combustible	33,79%
Neumáticos	5,34%
Mantenimiento	1,66%
Reparaciones	2,94%

Tabla 3-1. Contribución porcentual de cada coste del tramo terrestre de la cadena. Fuente: Ministerio de Fomento.

Los costes kilométricos asociados al TMCD son los relativos a los acarreo terrestres. En este sentido, éstos son los que cargarán con los costes kilométricos y, como también consumen tiempo, tendrán su correspondiente componente de coste proveniente del tiempo transcurrido durante el recorrido. De esta manera, resulta que el coste directo total de los acarreo terrestres (suma de costes del tiempo y kilométricos) es de 0,904 €/km recorrido o, de manera equivalente, 60,294 ² €/h de trayecto.

² La conversión de unidades se ha realizado bajo la hipótesis que un transportista realiza 120.000 km en un año y trabaja 1.800 horas anuales. Así, la suma de los costes del tiempo más los costes kilométricos es de 108.529 €/año que, dividido por los 120.000 km resulta 0,904 €/km o, dividido por 1.800 horas, es 60,294 €/h. Fuente: *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera*.

A este coste unitario conviene añadir un coste de 0,0624 €/km³ correspondiente al pago de autopistas de peaje. Así, el coste unitario por kilómetro recorrido resulta de 0,966 €/km, de lo se deduce que el coste total para ir de i a j (C_{ij}^t) vendrá dado por la expresión (3-4):

$$C_{ij}^t(d_{ij}) = 0,966d_{ij} \quad (3-4)$$

donde,

d_{ij} = distancia directa terrestre entre el origen i y el destino j (km)

Atendiendo a que en este estudio se analiza el caso de TMCD en el que únicamente viaja el semirremolque en el buque, hay que tener en cuenta el coste asociado al tiempo que la mercancía permanece en el buque. Bajo esta hipótesis, pueden considerarse despreciables las partidas correspondientes a la cabeza tractora (amortización, financiación, seguros, etc.), la nómina del conductor (ya que al viajar la plataforma sola el conductor puede desarrollar una actividad paralela por la que es remunerado) y las dietas del mismo. Además, los costes kilométricos son despreciables (combustible, neumáticos, reparaciones y mantenimiento). De esta forma, y multiplicando por un coeficiente de trabajo diario 9/24 que representa la parte proporcional del tiempo de trabajo efectivo, se obtiene un coste unitario del tiempo de 1,73 €/h. La expresión (3-5) representa el coste por hora de navegación marítima asociado al tiempo que el semirremolque permanece en el buque:

$$C_{pb}(T_m) = 1,73T_m \quad (3-5)$$

donde,

T_m = tiempo del tramo marítimo de la cadena del transporte (h)

3.3.4 Costes de inventario del tramo terrestre

En el apartado 3.5.7 se analizan de forma genérica los costes de inventario relacionados con el transporte de mercancías. A título de anticipo, en el presente estudio se ha considerado que estos costes dependen del tiempo total de tránsito y del tipo de mercancía transportada. La expresión (3-6) representa este tipo de costes del tramo terrestre de la cadena del transporte.

$$f_{6a}(d_{ij}, \alpha) = \alpha T_{ij}^t = \alpha 0,0265d_{ij} \quad (3-6)$$

donde:

T_{ij}^t = tiempo del tramo terrestre de la cadena del transporte (h)
 d_{ij} = distancia terrestre entre el origen i y el destino j (km)
 α = parámetro que depende del tipo de mercancía (€/h)

³ Este coste unitario corresponde al coste medio obtenido mediante el análisis del coste de las principales autopistas de peaje de España, Francia e Italia. Fuente: www.mappy.com

3.4 La operativa portuaria del TMCD

3.4.1 Concepto y definición

Una terminal portuaria es un intercambiador modal que dispone de un espacio para el almacenaje terrestre y coordina los distintos ritmos de llegada de los medios de transporte terrestre y marítimo. En particular, la misión principal de la terminal portuaria es la de proporcionar los medios y la organización necesaria para el intercambio de la plataforma o semirremolque entre los modos de transporte terrestre y marítimo y que éste se realice en condiciones óptimas de rapidez, eficacia y economía.

Los principales agentes involucrados en la operativa portuaria son los siguientes:

- Superficie o campa de almacenamiento. Ocupa la mayor parte de la superficie de la terminal portuaria y se considera que es suficientemente extensa como para almacenar la totalidad de plataformas que deberán ser cargadas o descargadas al buque atracado en el muelle.
- Elemento de interconexión terrestre-marítimo. La grúa mafi es la solución tecnológica considerada para la realización de los movimientos necesarios para transportar las plataformas estacionadas en la superficie de almacenamiento hasta el buque ro-ro atracado en el muelle como indica el esquema de la Figura 3-4.
- Buque atracado. Se analizará el caso de un buque que dispone de una rampa para el acceso de carga rodada al mismo.

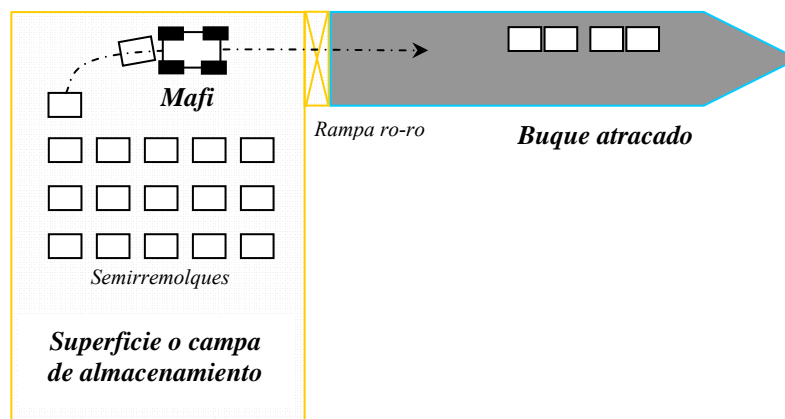


Figura 3-4. Esquema de la operativa portuaria en la terminal de TMCD.

3.4.2 Tiempo dedicado a la operativa portuaria

La interconexión entre el lado terrestre y marítimo es precisamente la parte de la operativa portuaria analizada en este caso. El principal agente que interviene en esta parte de la cadena son las sociedades de estiba.

Las sociedades de estiba son las que proporcionan los servicios de carga y descarga al buque. Para la realización de sus actividades, las empresas estibadoras disponen de un personal mínimo en situación de relación laboral común, con el que se asegura el funcionamiento de la estructura básica de la empresa. Sin embargo, resultaría extremadamente costoso para dichas empresas que su personal estuviese dimensionado para los momentos de máxima actividad (cuando en una misma jornada concurrieran varios buques para su manipulación en la terminal), mientras que en otros periodos de tiempo, en los que ningún buque recale en la misma, el personal deba permanecer ocioso. Así, la irregularidad en la llegada de los buques a puerto hace que no sea asumible el disponer en nómina, por parte de las terminales, del personal especializado y suficiente para atender a las puntas. Para dar cobertura a este problema, se han creado las Sociedades Estatales de Estiba. Las Sociedades de Estiba actúan como *pool* de personal para las empresas estibadoras, proporcionándoles personal cualificado para la realización de los trabajos portuarios a medida que estas lo necesitan. El personal proporcionado por la Sociedad de Estiba acude a las diferentes terminales a requerimiento de las mismas en función de las necesidades de cada jornada. El artículo 85 de la Ley 48/2003 detalla en qué consisten estas actividades. En el presente estudio se analizará únicamente el caso de carga/descarga de buques ro-ro que operan con plataformas.

Para determinar el tiempo dedicado a la operativa portuaria es necesario un análisis de los distintos elementos que intervienen en la operativa portuaria enunciados en el apartado 3.4.1.

En primer lugar, según el *Convenio colectivo para la regulación de las relaciones laborales del sector portuario de la provincia de Barcelona* del 2005, para tráficos tipo ro-ro y carga/descarga de plataformas, un equipo de trabajo está formado por:

- 1 Capataz de operaciones
- 1 Controlador de mercancías
- 4 Especialistas
- 1 Especialista para manivela en tierra.
- Oficial Manipulante mínimo (mafista).

Los rendimientos exigidos en el convenio son de aproximadamente de 15 plataformas/mafi y los turnos de trabajo son de 6 horas, ya que a los tráficos ro-ro les corresponden las denominadas jornadas intensivas.

En la actualidad, y como hipótesis para determinar el tiempo de operativa, se puede considerar que el tiempo necesario para cargar y/o descargar un buque es de seis horas, tiempo equivalente a la duración de los turnos de trabajo de las Sociedades de Estiba. Estas sociedades proporcionan los medios y equipos de trabajo necesarios para efectuar las operaciones requeridas en el tiempo especificado anteriormente y son raras las veces en las

que un buque no puede ser cargado en estas seis horas. En caso de superar la duración de un turno de 6 horas, la parte contratante del servicio efectúa el pago de una prolongación de la jornada, pagada a precio de horas extras, un 50% más caras que las de turno normal.

Para determinar el tiempo necesario para llevar a cabo la transferencia de carga del lado terrestre al marítimo se asumirán las siguientes hipótesis:

- El tiempo de trincaje de una plataforma al mafi (t_{pm}) será de 2,5 minutos. Asimismo, el tiempo destinado al trincaje de una plataforma al buque (t_{mb}) será de 2,5 minutos.
- La velocidad de las grúas mafi será de 23 km/h. Esta velocidad permitirá definir el tiempo invertido en el recorrido que tiene que realizar el mafi en la ida (desde la campa de almacenamiento al buque, t_{ida}) y la vuelta (desde el buque a la campa, t_{vuelta}).



Figura 3-5. Interior de un buque ro-ro.

De esta manera, el tiempo de operativa portuaria de una plataforma i vendrá definido por la suma de los siguientes tiempos:

$$T_{op}^i = t_{pm}^i + t_{ida}^i + t_{mb}^i + t_{vuelta}^i \quad (3-7)$$

Según el estudio *Las Autopistas del Mar. Definición y establecimiento de criterios de calidad para servicios TMCD* (Puertos del Estado, 2005), la campa de almacenamiento de una terminal TMCD debe tener una superficie 2,5 mayor a la capacidad del buque mayor que opere en la línea. Además, dicho informe apunta que es necesario separar la zona de manipulación de plataformas de la de almacenamiento de las mismas. En la Tabla 3-2 se indican los valores utilizados para definir el tiempo de operativa del estudio.

Concepto	Valor
Superficie	2,5 veces capacidad buque
Ancho cantil	60 m
Ancho viales	10 m

Concepto	Valor
Ancho de aparcamiento	3,5 m

Tabla 3-2. Indicadores de la terminal TMCD.

La disposición en planta de la campa, dedicada exclusivamente a la manipulación de mercancías, para determinar el tiempo de operativa será la representada en la Figura 3-6, donde:

d_{cantil} = distancia desde el cantil del muelle al acceso de la rampa ro-ro (m).

w_{ap} = ancho de una plaza de aparcamiento en batería (m).

d_{max} = distancia máxima desde el muelle a la última plataforma aparcada (m).

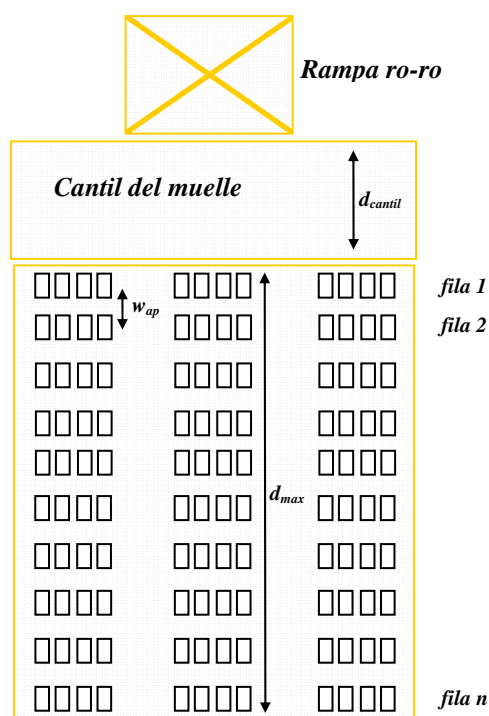


Figura 3-6. Esquema de la disposición en planta de una campa TMCD.

El buque tipo que operará en la idealización de la campa de almacenamiento será uno de capacidad media con un arqueo bruto de 15.500 GT, lo que se traduce en una capacidad para albergar 120 plataformas⁴. Así, la capacidad de manipulación de plataformas de la campa es de 120 y la capacidad de la campa de almacenamiento será de 180 plataformas más, lo que supone una capacidad para la terminal de TMCD para gestionar un total de 300 plataformas.

⁴ La expresión que relaciona el arqueo bruto de un buque y el número de plataformas que éste puede almacenar en su interior se presenta en el apartado 3.5 del presente capítulo.



Figura 3-7. Campa de almacenamiento de la terminal TMCD del puerto de Tarragona.

Por otra parte, a efectos del presente estudio, se considerará despreciable la diferencia de tiempo existente entre la manipulación de plataformas en una misma fila ya que el operador de la grúa mafi siempre efectúa el recorrido mínimo para acceder a las plataformas, por lo que se puede considerar que, en promedio, todas las plataformas ubicadas en una misma fila tienen el mismo tiempo de operativa. Además, como premisa de operación, se considerará que la Sociedad de Estiba suministrará los recursos necesarios para que el tiempo de operativa sea inferior a 6 horas, por lo que, independientemente del número de plataformas a manipular, el número de mafis que operarán en la terminal $N_m(n)$ será el definido en la Tabla 3-3.

Plataformas	Nº de mafis $N_m(n)$
1-75	1
76-135	2
>135	3

Tabla 3-3. Número de mafis según plataformas en la camp.

En consecuencia, los tiempos de recorrido de ida y vuelta de una plataforma i por la superficie portuaria vendrán definidos por la siguiente expresión:

$$t_{ida}^i = \frac{d_{cantil} + w_{ap}(i-1)}{v_{mafi} \cdot N_m(n)} = t_{vuelta}^i \quad (3-8)$$

donde,

- d_{cantil} = distancia desde el cantil del muelle al acceso de la rampa ro-ro (m). Se tomará un valor de 60 metros.
- w_{ap} = ancho de una plaza de aparcamiento en batería (m). Se tomará 3,5 metros.
- v_{mafi} = Velocidad de la grúa mafi (m/s), Se tomará un valor de 6,4 m/s.
- $N_m(n)$ = número de mafis operando según los valores indicados en la terminal TCMD.

De esta manera, la expresión que representará el tiempo que necesita el buque para ser cargado o descargado, entendido éste como el tiempo que transcurre entre la primera y última plataforma cargada o descargada en el buque vendrá definido por la expresión (3-9).

$$\begin{aligned}
 T_{op} &= \sum_{i=1}^n \frac{t_{pm}^i + t_{ida}^i + t_{mb}^i + t_{vuelta}^i}{N_m(n)} = \sum_{i=1}^n \frac{2(t_{pm}^i + t_{ida}^i)}{N_m(n)} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_{pm}^i + t_{ida}^i}{N_m(n)} \right) = \\
 &= \frac{2 \sum_{i=1}^n t_{pm}^i}{N_m(n)} + \frac{2 \sum_{i=1}^n t_{ida}^i}{N_m(n)} = \frac{2nt_{pm}}{N_m(n)} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{d_{cantil} + w_{ap}(i-1)}{v_{mafi} N_m(n)} = \\
 &= \frac{2nt_{pm}}{N_m(n)} + \frac{2nd_{cantil}}{v_{mafi} N_m(n)} + \frac{2w_{ap}}{v_{mafi} N_m(n)} \sum_{i=1}^n (i-1) = \\
 &= \frac{2nt_{pm}}{N_m(n)} + \frac{2nd_{cantil}}{v_{mafi} N_m(n)} + \frac{2w_{ap}}{v_{mafi} N_m(n)} \left(\frac{n(n+1)}{2} - n \right)
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

La expresión anterior se ha representado gráficamente (Figura 3-8), donde se muestra el tiempo de carga y descarga según el número de plataformas y la cantidad de mafis que operan en la campa $N_m(n)$, resultando siempre un tiempo de operativa inferior a 6 horas.

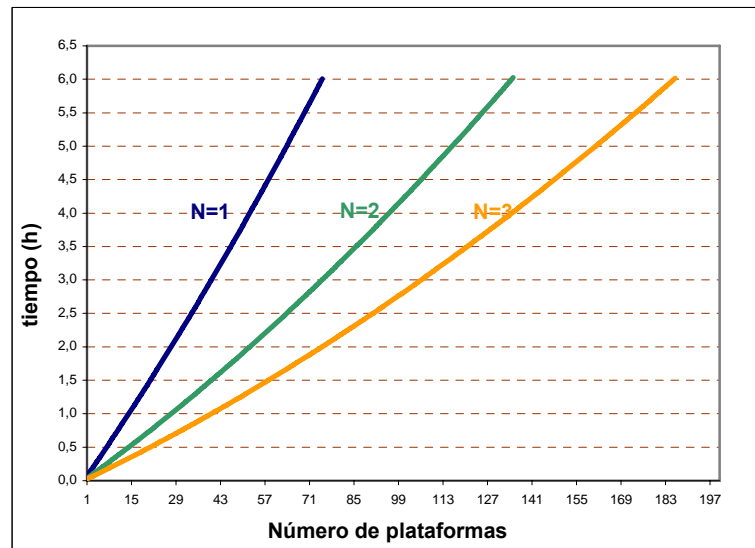


Figura 3-8. Tiempo de dedicado a la operativa portuaria en función del número de mafis.

Se propone las expresiones de tipo potencial de la Tabla 3-4 para representar el tiempo de operativa en función del número de mafis.

Plataformas	Nº de mafis $N_m(n)$	Expresión	
1-75	1	$T_{op}=0,0641 \cdot n^{1,0443}$	$r^2=0,99$
76-135	2	$T_{op}=0,0296 \cdot n^{1,0726}$	$r^2=0,99$
>135	3	$T_{op}=0,0184 \cdot n^{1,0943}$	$r^2=0,99$

Tabla 3-4. Expresiones del tiempo de operativa.

3.4.3 Coste de la operativa portuaria

El coste asociado a la operativa portuaria se obtendrá multiplicando el tiempo de operativa por el coste de los servicios portuarios asociados a la operativa ro-ro.

En este punto se propone una correlación entre el arqueo bruto de un buque (GT) y la capacidad para almacenar plataformas (n), realizada en base a los datos disponibles de los buques que operan en las principales líneas TMCD europeas y un estudio elaborado por Camarero y Polo (2005) en el que se analiza la capacidad y velocidad de los buques ro-ro. La expresión (3-10) refleja esta relación.

$$\ln(n) = 0,4404 \ln(S) + 0,6386 \quad r^2 = 0,75 \quad (3-10)$$

donde,

S = capacidad del buque expresada en función de su arqueo bruto (GT).

Transformando la expresión anterior en una del tipo Cobb-Douglas, se obtiene la siguiente función (3-11) o su equivalente (3-12):

$$n(S) = 1,894 S^{0,441} \quad (3-11)$$

$$S(n) = 3,532 n^{1,699} \quad (3-12)$$

Por lo que, asumiendo un coste de operaciones de 124,11 €/plataforma⁵ (incluye los equipos necesarios, mafistas y recorridos mayores de 6 metros en el muelle), se llega a la expresión (3-13) que expresa el coste asociado a la operativa marítima en función del arqueo bruto del buque:

$$C_{op}(S) = 1,894 S^{0,441} 124,11 = 235,064 S^{0,441} \quad (3-13)$$

Para finalizar, comentar que los costes de inventario de esta parte de la cadena (que existen ya que se consume tiempo en la operativa portuaria) se desarrollan en el punto 3.5.7 del siguiente apartado.

⁵ Valor obtenido del Artículo 24 de la Ley 48 / 2003, de 26 de Noviembre, de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general.

3.5 Tramo marítimo

3.5.1 Concepto y definición

El tramo marítimo de la cadena consiste en el ruta marítima que un buque ro-ro deberá cubrir para transportar las mercancías a su destino. En esta parte de la cadena del TMCD el transportista debe efectuar el pago de un importe que fija la compañía naviera por prestar sus servicios marítimos denominado flete.

El precio del flete incluye el transporte de la plataforma a su destino, el peritaje de la mercancía, recargos derivados de la actualización del precio del combustible o del pasaje y la gestión del consignatario de la mercancía. En este apartado se analizarán todos aquellos costes derivados de la gestión y explotación de un buque, de forma similar a lo expuesto en el apartado 3.3 para el transporte terrestre de mercancías.

En este sentido, para determinar los costes asociados al tramo puramente marítimo de la cadena del TMCD, se ha desarrollado una metodología que represente cada uno de los siguientes costes agrupados en tres categorías:

- Costes proporcionales al tiempo. En esta categoría se han agrupado los costes relativos a la tripulación del buque, los costes capitales (*capital costs*), los costes de mantenimiento del buque y los costes de inventario. Se determinará también una función que permita obtener el tiempo de navegación marítima en función del arqueo bruto del buque.
- Costes proporcionales a la distancia recorrida. Los costes de combustible pertenecen a esta categoría.
- Costes asociados a las tasas y tarifas portuarias. Estos costes son proporcionales al tiempo que un buque debe permanecer en el muelle y representan el coste de las tasas y tarifas aplicables al transporte marítimo (Ley 48/2003).

A continuación se describirá la metodología adoptada para determinar cada uno de los costes presentados.

3.5.2 Coste del capital

Al no disponer de datos suficientes sobre el precio de buques ro-ro de nueva construcción, se tomaron los datos del informe de la *Gerencia del Sector Naval* (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 2005) en el que se ofrecía la evolución del precio medio de buques de nueva construcción utilizando los precios de los principales astilleros japoneses y coreanos. El precio publicado aparecía en función del arqueo bruto compensado, medida que se obtiene a partir de las toneladas de arqueo bruto y un coeficiente de compensación para cada tipo y tamaño de buque, que considera la complejidad constructiva en base a las horas de trabajo empleadas en su fabricación.

En base al citado informe, en función del peso muerto del buque, se puede tomar el coeficiente de compensación correspondiente de la Tabla 3-5.

TPM	Coefficiente de compensación CGT/GT
Menor de 4.000	1,50
De 4.000 a 10.000	1,05
De 10.000 a 20.000	0,80
De 20.000 a 30.000	0,70
De 30.000 y mayores	0,65

Tabla 3-5. Coeficientes de compensación. Fuente: Informe de la Gerencia del Sector Naval (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 2005)

De esta manera, a partir de un precio de 1.156 €/CGT se pudo obtener una estimación del precio de los buques de nueva construcción que operan en líneas TMCD en aguas del arco mediterráneo y del atlántico. Así, considerando un periodo de amortización de 20 años, una vida útil del barco de 20 años, pago al contado del 20% del valor inicial del buque, un valor residual del buque del 15% sobre el precio inicial del mismo y unos intereses anuales del 5,211%⁶, se obtuvo la relación (3-14), que expresa los costes capitales por día.

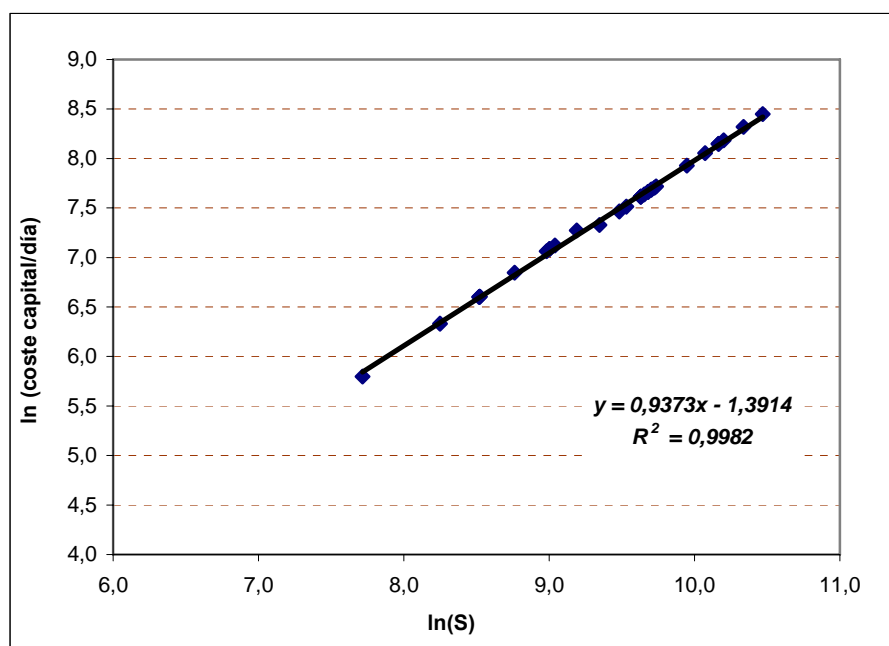


Figura 3-9. Relación entre el arqueado bruto y el coste del capital.

$$\ln(\text{capital costs}) = 0,9373 \ln(S) - 1,394 \quad r^2 = 0,98 \quad (3-14)$$

La función anterior se puede expresar mediante una del tipo Cobb-Douglas (3-15), siendo $f_I(S)$ la función que expresa los costes del capital diarios en función de la capacidad del buque (S) expresada en toneladas de arqueado bruto:

⁶ Las hipótesis tomadas para el cálculo son las recomendadas en el informe Construcción Naval (2005) del Sector de la Gerencia Naval, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

$$f_1(S) = 0,248S^{0,937} \quad (3-15)$$

La función obtenida es distinta de la propuesta por varios autores (K. Cullinane y M. Khanna, 1998) que calcularon esta misma función para el cálculo de costes del capital para buques portacontenedores. La revolución de los puertos a finales de los años 90, motivada en gran parte gracias a la contenerización de mercancías, desencadenó la aparición de numerosísimos estudios sobre tráfico de contenedores y operatividad portuaria. La gran cantidad de datos disponibles y la rápida reacción de los astilleros en la construcción de nuevos buques portacontenedores generó una nueva situación en el mercado internacional de transporte de mercancías en el que aquél que se adaptara más rápida y eficazmente conseguía mayor productividad. Sin embargo, la sustanciosa bajada de precios de los buques de nueva construcción entre los años 1998 y 2004 y las notables diferencias existentes entre los precios y características de los buques ro-ro frente a los grandes portacontenedores, justifican la estimación de esta función para el presente estudio.

Por otro lado, para determinar el tiempo total de viaje, se ha buscado una función que exprese la velocidad de los buques entregados a partir del 2000 en función de su arqueado bruto. Esta circunstancia se debe a la modernización tecnológica del sector que en los últimos años ha aumentado la potencia de los motores con el consiguiente aumento de la velocidad.

La correlación entre velocidad (en nudos) y el arqueado bruto del buque la refleja la expresión (3-16) y en la Figura 3-10.

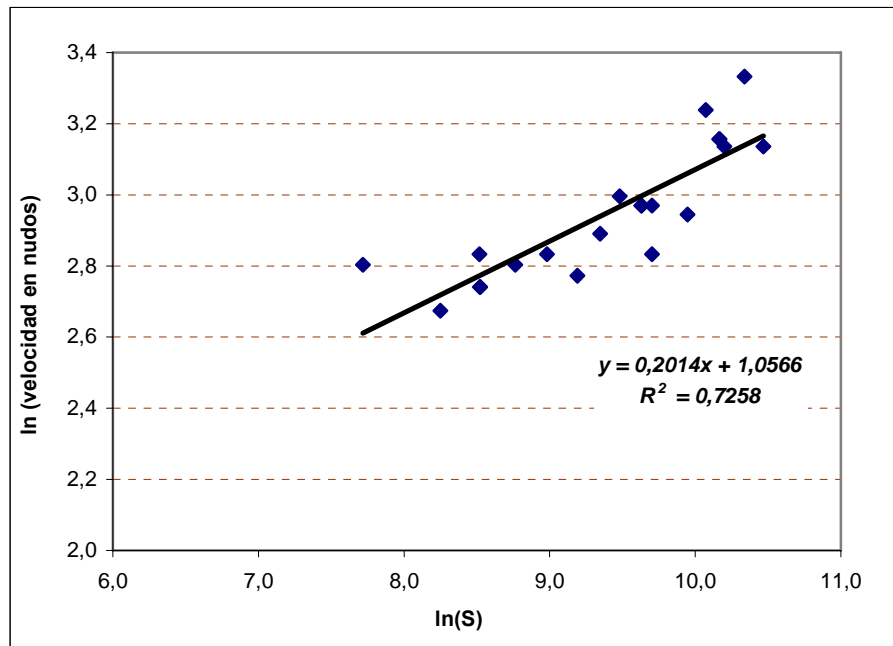


Figura 3-10. Relación logarítmica entre la velocidad y el arqueado bruto del buque.

$$\ln(\text{velocidad}) = 0,2014 \ln(S) + 1,056 \quad r^2 = 0,73 \quad (3-16)$$

Transformando la expresión anterior en una del tipo Cobb-Douglas, se obtiene la función $T_m(S, d_m)$, que expresa el tiempo total de navegación marítima en función de la capacidad del buque S y la distancia d_m , en millas náuticas, entre el puerto origen y el de destino.

$$T_m(S, d_m) = \frac{d_m}{2,877S^{0,201}} \quad (3-17)$$

3.5.3 Coste de reparaciones, mantenimiento, seguros y trámites administrativos

La dificultad para acceder a información relativa a este tipo de costes ha llevado a la necesidad de utilizar hipótesis de los principales estudios sobre evaluación de costes del sector náutico. Jansson y Shneerson (1988) proponen que los costes de mantenimiento representan aproximadamente un 3,5% de los costes del capital diario, por lo que la función de costes $f_2(S)$ asociada al mantenimiento y otras operaciones corresponderá a la expresión (3-18).

$$f_2(S) = 0,009S^{0,937} \quad (3-18)$$

Si bien es cierto que este tipo de costes representan un pequeño porcentaje del total de los costes del tramo marítimo de la cadena, a medida que la edad de los buques es mayor, mayores son también los costes asociados a mantenimiento, seguros, etc. No obstante, se toma como válida la hipótesis tomada ya que no incide de forma significativa al coste total del transporte marítimo.

3.5.4 Coste de la tripulación

La función que se propone en este apartado representa los costes diarios en una embarcación ro-ro derivados de las nóminas de la tripulación y de las diversas operaciones que se efectúan a bordo del buque como el mantenimiento de máquinas.

Es importante comentar la variabilidad en cuanto al número de tripulantes que puede presentar un buque. En base a la propuesta que realizan Jansson y Shneerson (1984) para determinar el coste de la tripulación consistente en hacer éste proporcional a la capacidad del barco, se ha comprobado, en base a los datos de los buques ro-ro de los tráficos TMCD, la correlación entre arqueado bruto y tripulación mediante ajuste logarítmico según la Figura 3-11.

De esta manera, conociendo la relación entre capacidad del buque y la tripulación que posee, se puede hallar una función que represente el coste de la tripulación en función del arqueado bruto del buque. Las nóminas de los tripulantes de la marina mercante se han obtenido a partir de un estudio de Subirana (Facultad de Náutica de Barcelona, 2005) de la. La función obtenida es la indicada en la expresión (3-19).

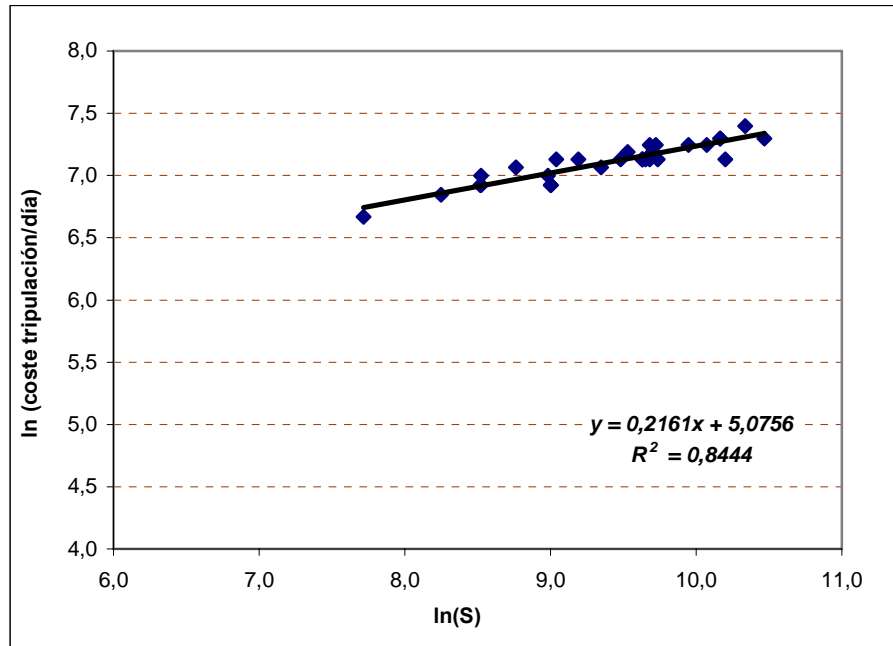


Figura 3-11. Relación entre los costes de la tripulación y el arqueado bruto del buque.

$$\ln(\text{costes tripulación}) = 0,2161 \ln(S) + 5,0756 \quad r^2 = 0,84 \quad (3-19)$$

Aplicando una fórmula del tipo Cobb-Douglas se obtiene la expresión (3-20), $f_3(S)$, que representa los costes diarios derivados de las nóminas de la tripulación en función de la capacidad del buque (S):

$$f_3(S) = 160,061S^{0,216} \quad (3-20)$$

La tendencia actual en la construcción de buques tipo ro-ro apunta a que este tipo de costes bajarán gracias al elevado grado de modernización tecnológica de las naves que permite una reducción del número de tripulantes.

3.5.5 Coste del combustible

Como primera hipótesis, se puede asumir que el consumo específico de combustible y la potencia del buque son proporcionales entre sí. Por otra parte, un estudio reciente elaborado por Polo, G., Camarero, A. y Pery, P. (2003) constata que a partir de los años 90 hasta la actualidad, la potencia media de los buques ro-ro entregados ha pasado de 9.300 a más de 20.000 kW por lo que la función de consumo de combustible estará también relacionada con el año de entrega del buque ro-ro.

Por otra parte, en base a los datos relativos a los buques que operan en líneas TMCD europeas, se ha calculado el consumo de combustible diario de cada uno de ellos y se ha analizado si existe alguna relación entre la capacidad del buque y el consumo de combustible en base a la potencia de los mismos.

El consumo anual de combustible (CAC) se puede calcular según la expresión (3-21), proporcionada por el *Norwegian marine technology research institute* (2003):

$$CAC = P \eta SFOC h C_{combustible} \quad (3-21)$$

donde:

- P : potencia del sistema de propulsión del buque (kW)
 η : rendimiento del motor para alcanzar la velocidad de diseño
 $SFOC$: consumo específico de combustible (para nuevos buques ro-ro, 0,185 kg/kW·h)
 h : horas totales anuales recorridas (h)
 $C_{combustible}$: coste del combustible (€/kg)

La relación entre el consumo de combustible por milla recorrida y la capacidad del buque expresada en toneladas de arqueado bruto (S) es la representada en la Figura 3-12.

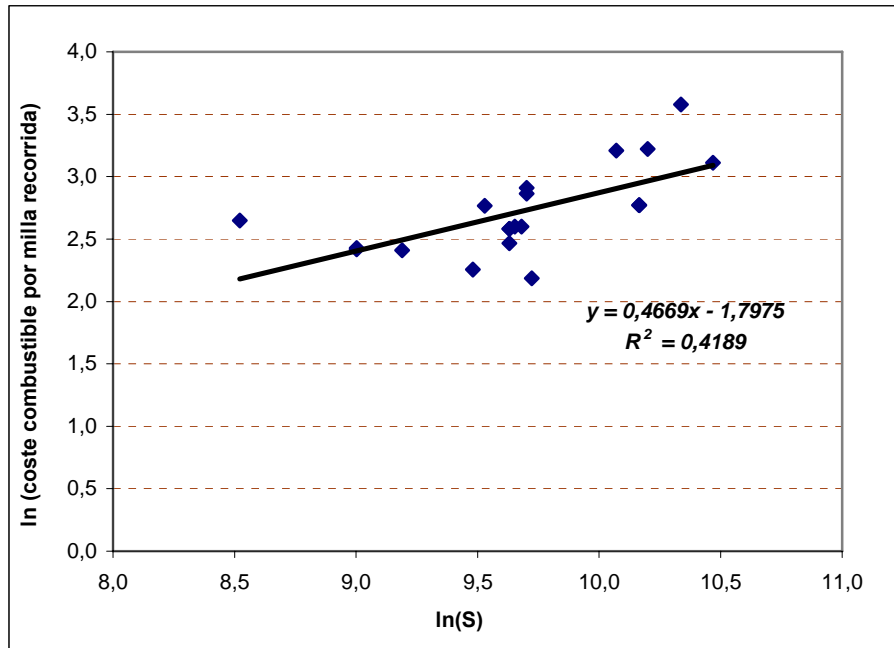


Figura 3-12. Relación logarítmica entre los costes de combustible y el arqueado bruto de todos los buques disponibles.

$$\ln(\text{costes combustible}) = 0,467 \ln(S) - 1,798 \quad r^2 = 0,42 \quad (3-22)$$

De la expresión (3-22) se llega a que el grado de correspondencia entre ambas variables es muy poco significativo. Ahora bien, seleccionado aquellos buques cuyo año de entrega es posterior al 2000 y realizando el mismo análisis, se obtienen los resultados representados en la Figura 3-13 y la expresión (3-23), de donde se desprende que la selección realizada es más idónea para representar el coste del combustible.

$$\ln(\text{costes combustible}) = 0,674 \ln(S) - 3,783 \quad r^2 = 0,79 \quad (3-23)$$

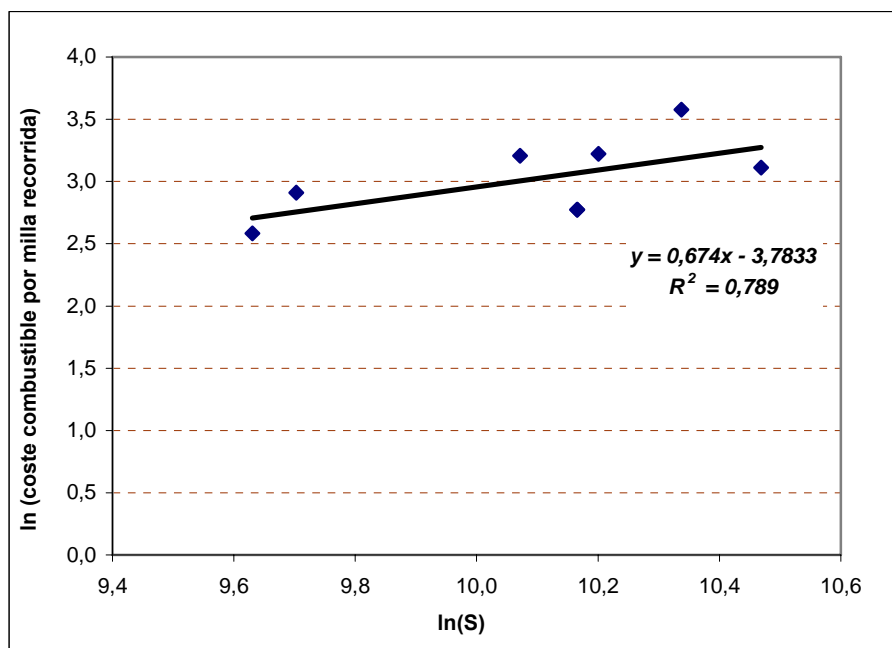


Figura 3-13. Relación entre el coste del combustible y el arqueado bruto del buque ro-ro.

Transformando la expresión (3-23) en una función tipo Cobb-Douglas se obtiene la expresión (3-24), $f_4(S)$, que representa el consumo de combustible por milla náutica recorrida:

$$f_4(S) = 0,022S^{0,673} \quad (3-24)$$

3.5.6 Coste de las tasas y tarifas portuarias

Las tasas portuarias son distintas para cada puerto y además dependen del rendimiento de cada terminal y del total de mercancías movidas. A continuación, se recogen las principales tasas y tarifas aplicables a un buque y a su mercancía en una terminal portuaria según la *Ley 48/2003, de 26 de noviembre, de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general*. En ninguna de las siguientes partidas está incluido el servicio de estiba o desestiba de las mercancías.

- Tasas aplicables
 - Tasas de señalización marítima. Dependen del arqueado bruto del buque. Se tomará como valor aproximado 0,8 €/100 GT.
 - Tasa al buque por estancia. Contabiliza el acceso y la estancia en el puesto de atraque y/o fondeo, colocado el buque de punta. Se toma como valor promedio 1,25 €/100 GT.
 - Tasa a la mercancía (no incluye los medios mecánicos ni equipos de manipulación, propios de las sociedades de estiba y desestiba). Se tomará 45,30 €/plataforma.
- Tarifas aplicables

- Tarifa por almacenaje. El primer día se considerará gratuito⁷.
- Tarifas por suministro:
 - Agua (2,1 €/m³).
 - Electricidad (0,12 €/kW·h).
- Tarifas de recepción de desechos⁸. Es función del arqueo bruto (GT) del buque y se puede considerar que equivale a la expresión (3-25).

$$des(S) = 1,495S^{0,544} \quad r^2 = 0,97. \quad (3-25)$$

- Tarifas por servicios diversos como, principalmente, la utilización de la rampa ro-ro de 67,0 €/h para la carga y descarga de plataformas o semirremolques.

Dado que muchas de las tasas y tarifas dependen del arqueo bruto del buque, se propone a continuación una función, $f_5(S)$, que representa la totalidad de los costes asociados a las tasas asumiendo las siguientes hipótesis simplificativas:

Las tasas asociadas a la mercancía (por unidad de carga) se pueden asumir proporcionales al arqueo bruto del buque considerando una correlación entre el arqueo bruto y la capacidad de almacenaje de los semirremolques presentada anteriormente:

$$n(S) = 1,894S^{0,441} \quad (3-11)$$

Por otro lado, se supondrá que el coste asociado a las tarifas de suministro es despreciable frente al total de la factura portuaria.

De esta manera, con las consideraciones tomadas se llega a una expresión $f_5(S)$ que representa la suma de los costes asociados a las tasas y tarifas portuarias por parada y buque lleno, que será:

$$f_5(S) = 0,021S + 85,617S^{0,441} + 1,495S^{0,544} + 67T_{op} \quad (3-26)$$

donde:

S : Arqueo bruto del buque (Tm)
 T_{op} : Tiempo dedicado a la estiba y/o desestiba de los semirremolques al buque (h)

3.5.7 Costes de inventario

Los costes de inventario tienen tres componentes básicas: el coste del stock de la mercancía, el coste de mantenimiento de inventario, expresado habitualmente como porcentaje del coste de la mercancía, y el tiempo transcurrido como stock.

⁷ En la mayoría de puertos de interés general del Estado, se da esta circunstancia. A partir del primer día, el coste por día de un semirremolque en la campa e almacenamiento es aproximadamente de 20 €/día-semirremolque.

⁸ Valores tomados del anuario económico del Puerto de Gijón (2005).

Estos costes dependerán fundamentalmente de la frecuencia de salidas de barcos ro-ro, de la capacidad de almacenamiento del buque y del tiempo de tránsito total de las mercancías. En la evaluación de estos costes deben tenerse en cuenta conceptos muy delicados como las diferencias entre flujo de material y flujo de caja, fiabilidad de los datos, homogeneidad de las unidades de los costes (sin márgenes empresariales), determinación de las unidades de negocio para diferenciar los costes asociados a envíos internos de partes producidas por la misma empresa, etc. Todo ello hace del cálculo del coste del inventario un complejo análisis económico por lo que, atendiendo estrictamente a los objetivos del presente estudio, se realizará una simplificación de este tipo de costes. En consecuencia, se tomará que los costes de inventario dependerán del tiempo total de tránsito de las mercancías y también del tipo de mercancía.

De esta manera, los costes de inventario denotados como $f_6(S, \alpha)$ dependerán del tiempo de tránsito total de las mercancías y del tipo de mercancía que transporta. Este último parámetro α se ha introducido en la modelización ya que, por ejemplo, los productos perecederos tendrán un coste de inventario muy superior a los que puedan tener mercancías como repuestos de automóvil o materiales de la construcción.

En este sentido, se asumirá que la función f_6 será para cada caso (acarreo terrestre, operativa portuaria o tramo marítimo) una de las siguientes expresiones:

$$f_{6t}(d_{ij}, \alpha) = \alpha T_{ij}^t = \alpha 0,0265 d_{ij} \quad (3-27)$$

$$f_{6op}(S, \alpha) = \alpha T_{op} = \alpha (T_{op}(n)) \quad (3-28)$$

$$f_6(S, \alpha) = \alpha T_m = \alpha \left(\frac{d_m}{2,877 S^{0,201}} \right) \quad (3-29)$$

donde:

T_{ij}^t :	tiempo del tramo terrestre de la cadena del transporte
T_m :	tiempo del tramo marítimo de la cadena del transporte
T_{op} :	tiempo dedicado a la estiba y/o desestiba de los semirremolques al buque (h). Es función del número de plataformas en la campa según lo indicado en el apartado 3.4.2
d_{ij} :	distancia terrestre entre el origen i y el destino j
d_m :	distancia marítima (millas) que separa el puerto origen y destino
S :	arqueo bruto del buque (T_m)
α :	parámetro que depende del tipo de mercancía (€/unidad de tiempo) ⁹

Nótese que el parámetro α depende únicamente del tipo de mercancía y del tiempo de tránsito de la misma, lo que permitirá determinar las cuotas de mercado que absorben la carretera y el TMCD respectivamente en función del tipo de mercancía que se introduzca en el modelo. Además, las funciones determinan el coste de inventario relativo a una unidad de transporte

⁹ En las funciones para determinar el coste de inventario del acarreo terrestre la unidad será de €/h, mientras que para el tramo marítimo será en €/día.

que, en el caso del presente estudio, corresponderá a una plataforma cargada con un tipo específico de mercancía caracterizada por el parámetro α .

Los valores que toma el parámetro α serán tratados extensamente en los apartados 0 y 5 dedicados a la resolución y aplicación práctica del modelo de distribución de mercancías del presente estudio.

3.6 Resumen de la formulación empleada

3.6.1 Tabla de fórmulas obtenidas

A continuación se ofrece en la Tabla 3-6 un resumen de las funciones y relaciones para poder modelizar la estructura de costes y tiempos asociados al TMCD

Tramo de la cadena	Concepto	Formulación propuesta	Unidades
Tramo terrestre	Coste unitario	$C_i^{ij}(d_{ij}) = 0,966d_{ij}$	€
	Coste inventario	$f_{6a}(\alpha, d_{ij}) = \alpha 0,0265d_{ij}$	€/plataforma
	Tiempo tramo terrestre	$T_i^{ij}(d_{ij}) = 0,0265d_{ij}$	h
Operativa portuaria	Coste operativa	$C_{op}(S) = 235,064S^{0,441}$	€
	Coste inventario	$f_{6b}(\alpha, S) = \alpha(T_{op}(S))$	€/plataforma
	Tiempo operativa	$T_{op}(S)$ de la Tabla 3-4	h
Tramo marítimo	Coste tramo marítimo	$C_m(S) = \sum f_i(S) + C_{pb} \quad i=1-6$	-
	Costes del capital	$f_1(S) = 0,248S^{0,937}$	€/día
	Coste de reparaciones, mantenimiento, seguros y trámites administrativos	$f_2(S) = 0,009S^{0,937}$	€/día
	Costes de la tripulación	$f_3(S) = 160,061S^{0,216}$	€/día
	Coste del combustible	$f_4(S) = 0,022 \cdot S^{0,673}$	€/día
	Coste de las tasas y tarifas portuarias	$f_5(S) = 0,021S + 85,617S^{0,441} + 1,495S^{0,544} + 79,931S^{0,699}$	€/parada
	Costes de inventario	$f_6(S) = \alpha d_m / 2,877S^{0,201}$	€/plataforma
	Coste de permanencia de una plataforma en el buque	$C_{pb} = 1,73T_m$	€/h
	Tiempo de navegación	$T_m(S, d_m) = d_m / 2,877S^{0,201}$	h

Tabla 3-6. Resumen de las expresiones que permiten obtener los costes y el tiempo de cada uno de los tramos de la cadena de TMCD.

A partir de las funciones presentadas en la Tabla 3-6 se está condiciones de plantear el problema de optimización de rutas para la distribución física de mercancías. En este punto es de utilidad realizar un breve análisis de sensibilidad de la variable S (arqueo bruto del buque en GT) para contrastar la bondad de la formulación obtenida mediante la metodología presentada en el presente capítulo.

3.6.2 Análisis de sensibilidad

Se tomará la formulación presentada en la Tabla 3-6 y, para distintos valores de las variables que definen el problema, se analizará la sensibilidad del coste total del transporte de mercancías para distintos valores de la capacidad del buque expresada en arqueo bruto (S) que relaciona ambos parámetros. Asimismo, se verificará la coherencia del modelo de costes con los precios actuales de mercado para verificar la validez del mismo.

Como se comentaba en el apartado 3.5.1 del presente capítulo, desde la óptica del transportista el coste del tramo marítimo se traduce en el pago del flete que fija la compañía naviera en función de la línea TMCD seleccionada. Con vistas a representar esta circunstancia, en la parte de costes correspondiente al tramo marítimo y a la operativa portuaria se introduce un parámetro δ que representa el margen de beneficio de la empresa naviera por la prestación de sus servicios de transporte marítimo. De esta manera, la suma de los costes de la operativa portuaria y el tramo marítimo estarán multiplicados por el factor $(1+\delta)$, donde δ es el margen de beneficio de la empresa naviera para obtener el valor del flete.

Los datos iniciales para realizar el análisis de sensibilidad se recogen en la Tabla 3-7

Parámetro	Significado	Valores para el análisis ¹⁰
d_{ij}	Distancia terrestre entre el origen i y el destino j	1.350 km
d_{ih}	Distancia terrestre entre el origen i y el puerto origen	110 km
d_{hj}	Distancia terrestre entre el puerto destino y el destino j	85 km
d_m	Distancia marítima entre puertos	450 millas
α	Tipo de mercancía para los costes de inventario	1,2 €/h
r	Ocupación del buque ro-ro	80%
δ	Beneficio de la compañía naviera	15%

Tabla 3-7. Resumen de las expresiones que permiten obtener los costes y el tiempo de cada uno de los tramos de la cadena de TMCD.

El principal objetivo de este apartado es conocer la sensibilidad del coste total del transporte en función de la capacidad del buque expresada en función del arqueo bruto. Para ello, se ha realizado una simulación en la que se ha analizado la variación del coste del transporte de una unidad de carga o semirremolque mediante TMCD en función de la capacidad del buque.

¹⁰ Los valores seleccionados corresponden a una ruta entre Berga (Catalunya) y Roma (Italia), utilizando el servicio TMCD entre el puerto de Barcelona y Civitavecchia. Fuentes: www.mappy.com y www.apb.es.

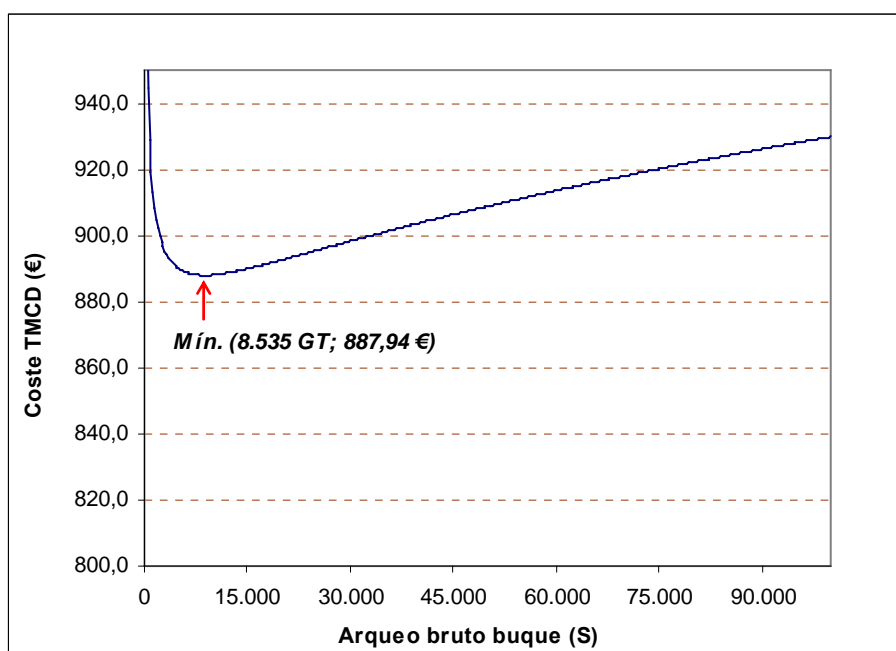


Figura 3-14. Relación entre el coste de transportar una plataforma mediante TMCD en función del arqueo bruto del buque ro-ro.

En la Figura 3-14 se observa, para las condiciones iniciales de la Tabla 3-7, la presencia de un mínimo para un arqueo bruto de aproximadamente 8.535 GT. Una forma de dar validez a los resultados obtenidos sería la de comparar el coste obtenido con aquello que los transportistas terrestres pagan por contratar un servicio TMCD. Analizando el precio del flete de los principales servicios de TMCD en la costa mediterránea y la distancia marítima que separa los puertos origen y destino (ver Tabla 3-8), resulta que el modelo propuesto se ajusta notablemente al importe que los transportistas pagan por este servicio.

Origen	Destino	Precio flete (€)	Tiempo de viaje (h)	d _m (millas)
Barcelona	Civittavechia	764	20	450
Barcelona	Génova	424	18	362
Tarragona	Civittavechia	600	30	485
Tarragona	Livorno	600	30	418
Tarragona	Salerno	700	32	620
Valencia	Livorno	812,5	36	534
Valencia	Salerno	855	42	722

Tabla 3-8. Características de los servicios TMCD en Catalunya. Fuente: www.mare-tir.it.

Al precio del flete conviene añadir el coste de permanencia de una plataforma en el buque y los costes de inventario de la mercancía durante el trayecto de navegación marítima para poder comparar los costes con el modelo. De esta manera, incrementando el precio del flete en una partida única de 72,0 € para un buque de 10.000 GT¹¹ y con la distancia marítima de cada ruta, se presenta la comparación de resultados en la Tabla 3-9.

¹¹ Precio del flete con un recargo de 72,0 € derivado de los costes de inventario y del coste asociado a la permanencia de una plataforma en el buque.

Origen	Destino	Precios de mercado		Modelo de costes	
		Precio flete (€)	Tiempo de viaje (h)	Coste modelo (€)	Tiempo de viaje (h)
Barcelona	Civittavechia	836	20	695,4	25
Barcelona	Génova	496	18	660,8	20
Tarragona	Civittavechia	672	30	710,3	26
Tarragona	Livorno	672	30	683,9	23
Tarragona	Salerno	772	32	764,1	34
Valencia	Livorno	884,5	36	729,5	29
Valencia	Salerno	927	42	805,6	39

Tabla 3-9. Comparación de resultados entre el precio del flete y sus costes adicionales con los resultados del modelo para un buque de 10.000 GT con capacidad para 110 plataformas y un 80% de ocupación.

Los resultados de la Tabla 3-9 demuestran la coherencia del modelo de costes con la realidad de los precios de mercado. Los servicios TMCD con origen en Tarragona son los que mejor se ajustan al modelo de costes con una desviación promedio del 2%. Por su parte, los servicios con origen en Barcelona son los que peor responden en el modelo, presentando el servicio BCN-CIV una desviación del 17% y el BCN-GEN una desviación del 33%. Finalmente, los servicios con origen en Valencia resultan un 15% más caros que los resultados del modelo.

Es importante destacar que las peculiaridades de cada ruta y las características específicas del buque que presta sus servicios son determinantes para determinar el precio final del transporte. Asimismo, las estrategias comerciales de cada compañía naviera hacen que, a menudo, el precio del transporte no responda estrictamente a criterios de coste como sí de competencia de mercado. Por este motivo, más allá de realizar un análisis del parámetro δ que representa el beneficio de la naviera, se toma como válido el modelo de costes y se pasa a analizar la contribución de cada uno de los costes de la cadena de TMCD en el coste final del servicio.

La contribución al coste total del TMCD de cada una de las partes de la cadena logística se representa en la Figura 3-15. En este análisis se adoptan nuevamente las hipótesis de partida de la Tabla 3-7.

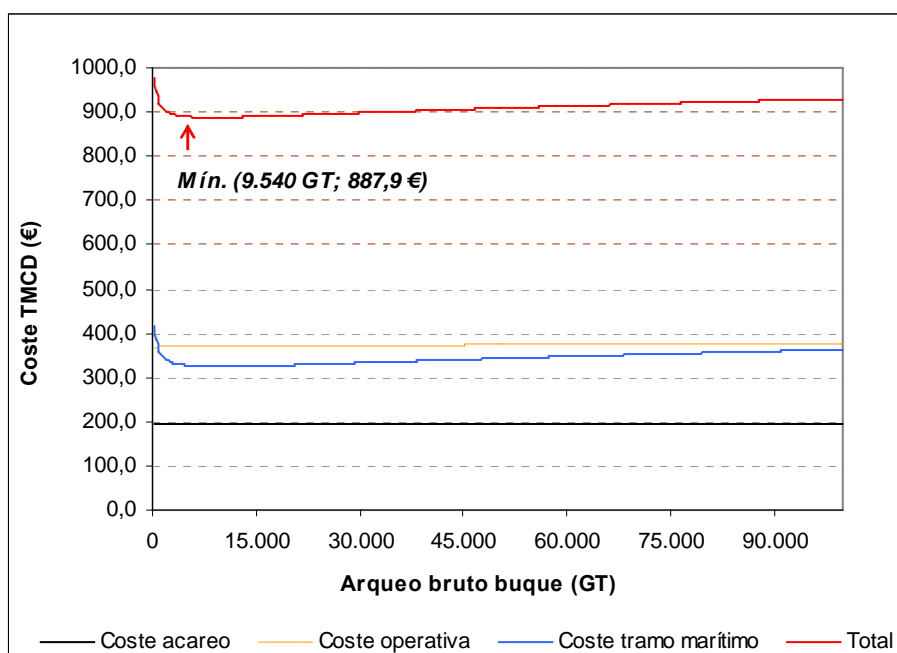


Figura 3-15. Contribución de cada tramo de la cadena de TMCD al coste del transporte de un semirremolque.

Como se puede observar en la Figura 3-15, el tramo de la cadena de TMCD más sensible a la capacidad del buque es el correspondiente al tramo marítimo de la cadena. La operativa portuaria presenta unos costes crecientes, pero que en el intervalo estudiado $GT \in \{1, 100.000\}$, su coste varía tan sólo un 3% por unidad transportada. Atendiendo a que el coste del acarreo terrestre es función exclusivamente de la distancia terrestre recorrida, su coste permanece constante una vez fijados los acarreos en origen y en destino.

En la Figura 3-16 se representa el porcentaje que representa cada tramo de la cadena TMCD sobre el coste total del transporte y se compara con el correspondiente al transporte de una plataforma mediante transporte terrestre bajo las condiciones de la Tabla 3-7.

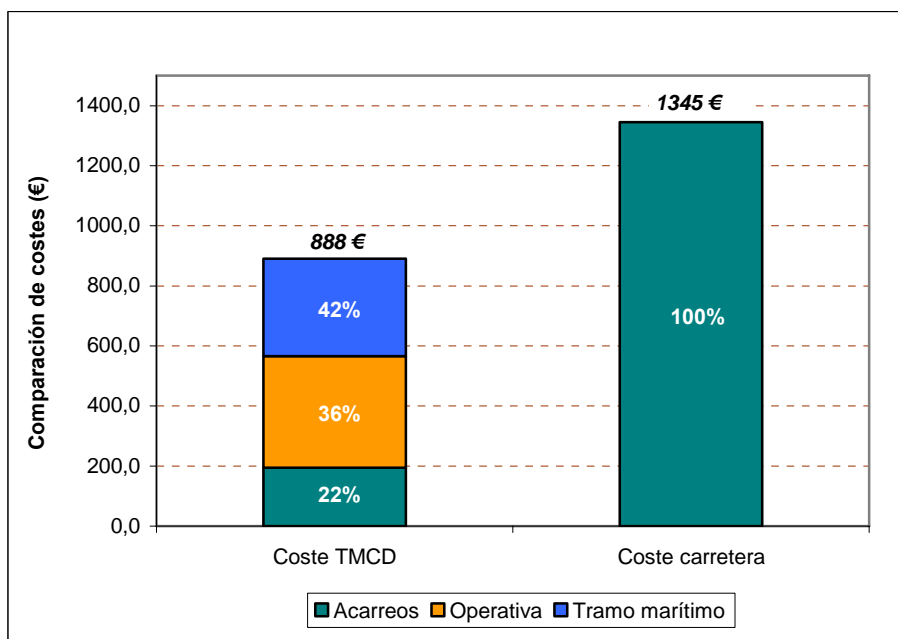


Figura 3-16. Comparación de costes entre la carretera y el TMCD.

Como se desprende de la Figura 3-16, la ruta Berga – Roma presenta unas condiciones magníficas para el transporte de mercancías mediante el TMCD. Se consigue un ahorro del 33% en términos de coste por unidad transportada y, dado que en el presente estudio se analiza el TMCD bajo la hipótesis que el conductor no acompaña la mercancía, surge una oportunidad de negocio ya que el conductor del camión puede realizar actividades paralelas al transporte puramente marítimo. Por su parte, se adjunta la comparación de tiempos de trayecto de las cadenas analizadas:

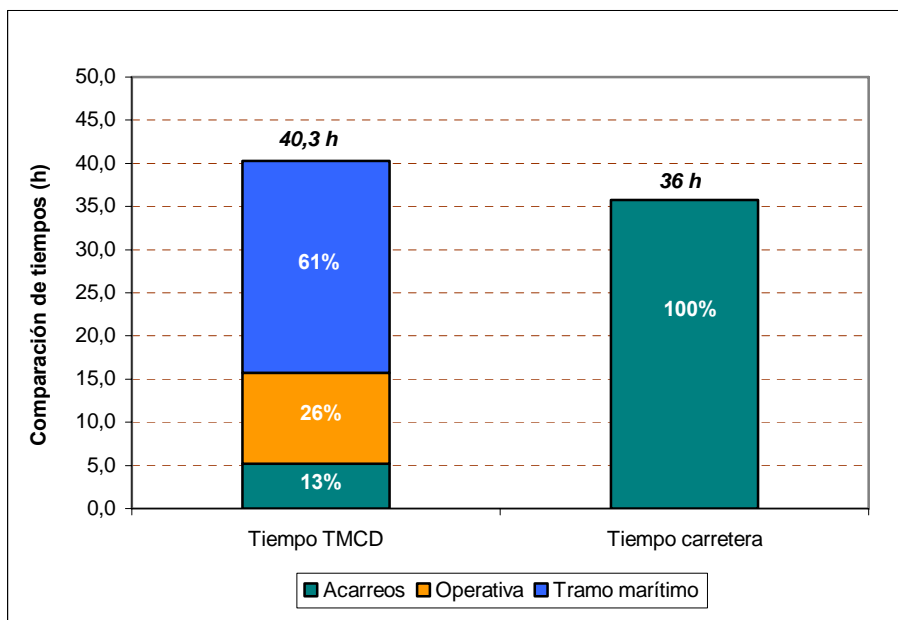


Figura 3-17. Comparación de tiempos entre la carretera y el TMCD.

En el caso analizado, la ruta mediante TMCD resulta un 13% más lenta que su competidora de la carretera. El tramo marítimo de la cadena es el que consume más tiempo de la cadena, lo

que da lentitud al trayecto en TMCD. Además, como se indicaba anteriormente, es precisamente el tramo marítimo el que mayores costes representa, por lo que es de especial importancia conocer qué costes pertenecientes al tramo marítimo de la cadena influyen de forma más significativa al coste total del transporte TMCD. Por este motivo, a continuación se analiza cada uno de los costes del tramo marítimo de la cadena TMCD en la Figura 3-18.

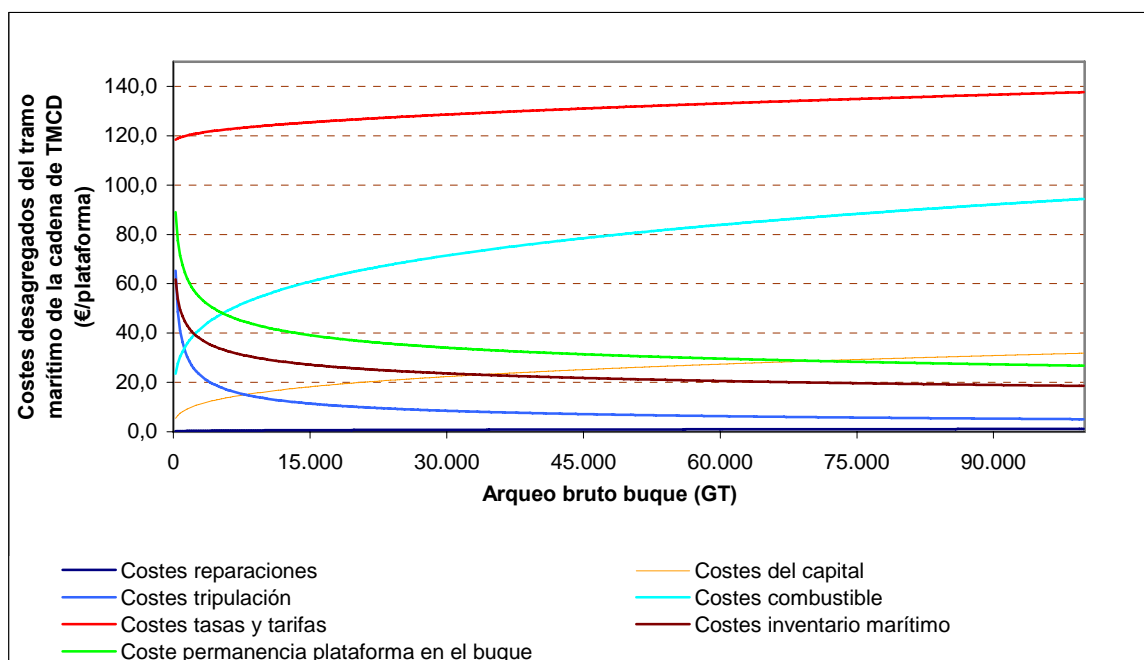


Figura 3-18. Costes desagregados del tramo marítimo de la cadena de TMCD.

Como se desprende de la Figura 3-18, el comportamiento de los costes asociados al tramo marítimo de la cadena TMCD es distinto según cada caso. Las principales conclusiones que se pueden extraer del análisis son las siguientes:

- En primer lugar, el coste de las reparaciones y mantenimiento presenta un comportamiento creciente con la capacidad del buque, pero en magnitud es poco relevante para el coste final de la factura marítima del transporte. Su valor es prácticamente residual.
- El coste de la tripulación es decreciente con la capacidad ya que aprovecha las economías de escala a medida que aumenta la capacidad del buque. Además, como ya se apuntaba en el punto 3.5.4, este resultado se corresponde con la tendencia actual de minimizar el número de tripulantes de una embarcación a medida que éstas se modernizan tecnológicamente.
- El coste de las tasas y tarifas portuarias es creciente con la capacidad, puesto que al aumentar la capacidad el buque aumentan los gastos en este tipo de costes, en especial la tasa a la mercancía.
- El coste de la permanencia de la plataforma en el buque disminuye a medida que aumenta la capacidad del buque puesto que, como sucedía en el caso de costes de la tripulación, a medida que aumenta la capacidad de un buque el coste medio de esta

partida disminuye con ésta. Además, como mayor sea la ocupación del buque, menor será este tipo de costes, ya que aumenta el rendimiento de transporte de plataformas. También se puede explicar esta circunstancia al hecho que la velocidad del buque se ha correlacionado con el arqueo bruto del mismo y, por consiguiente, cuanto mayor sea el buque, mayor será su velocidad y menor será el tiempo de tránsito, con lo que los costes de este tipo disminuirán.

- El coste del capital aumenta con la capacidad del buque como era de esperar.
- Los costes de combustible son los que crecen de forma más rápida con la capacidad del buque. A tenor de esta circunstancia, parece razonable pensar que la tendencia actual consistente en construir buques más grandes y más rápidos, que incrementan el consumo de combustible, puede ser contraproducente para los intereses de las compañías navieras debido a la inestabilidad del precio del crudo. No obstante, uno de los recargos habituales del flete denominado BAF (*Bunker Adjustment Factor*) seguirá siendo el mecanismo mediante el cual las navieras actualizan diariamente el precio del flete a partir de cualquier cambio en el precio del crudo. Hay que tener en cuenta que los costes de combustible en el transporte terrestre significan más del 33% del coste unitario del transporte terrestre, por lo que cualquier inestabilidad en el precio del petróleo afectará de manera notable cualquier modo de transporte que utiliza este combustible.
- El coste de inventario disminuye a medida que aumenta la capacidad del buque. Este coste experimenta el mismo comportamiento que el asociado al tiempo que la plataforma permanece en el buque.

A modo de ejemplo y al igual que se realizó en el punto 3.3.3 para las principales partidas de coste del tramo terrestre de la cadena, se detallan en la Tabla 3-10 para un buque ro-ro de 10.000 GT con capacidad para albergar 110 plataformas los costes desagregados del tramo marítimo de la cadena de transporte TMCD.

Concepto	Porcentaje del coste del tramo marítimo
Costes del capital	6,16%
Coste de reparaciones, mantenimiento, seguros y trámites administrativos	0,22%
Costes de la tripulación	5,19%
Coste del combustible	21,11%
Coste de las tasas y tarifas portuarias	39,87%
Costes de inventario	11,24%
Coste de permanencia de una plataforma en el buque	16,21%

Tabla 3-10. Contribución porcentual de cada coste del tramo marítimo.

4 Formulación y resolución del problema many to many

Una vez contrastada la metodología propuesta para determinar los costes y tiempos asociados a la cadena de TMCD, en el presente capítulo se procederá al análisis de rutas mediante la formulación de un problema *many to many* de distribución física de mercancías y a la resolución del mismo. Además, se ofrecen una serie de antecedentes entre los distintos trabajos realizados sobre el planteamiento de este tipo de problemas.

El principal objetivo del capítulo es definir un modelo de distribución de mercancías que permita modelizar la cadena logística del TMCD.

4.1 Antecedentes en el estudio de problemas routing

El diseño y modelización de sistemas de distribución física ha sido objeto de investigación de numerosos autores a lo largo de las últimas décadas. Diferentes trabajos han sido realizados, existiendo a día de hoy, multitud de formulaciones y programas que permiten tener una herramienta de diseño de utilidad para distintos ámbitos de aplicación en materia de transporte.

El avance de la ciencia en la tecnología de la computación y las mejoras en la optimización de códigos de programación ha hecho posible que, en el campo de la modelización del transporte, se utilicen modelos numéricos que resuelvan de forma competitiva muchos de los problemas planteados. Para resolver problemas de distribución de mercancías se utilizan normalmente los SIG (Sistemas de Información Geográfica) de tipo vectorial, que operan mediante módulos de redes junto con algoritmos de programación matemática para la selección de la ruta óptima en una red (Ahuja et al., 1993). Independientemente del grado de sofisticación, la mayoría de problemas exigen generar una amplia y compleja base de datos, que contenga información detallada sobre la región de distribución, así como sobre los puntos y modos de distribución. Esta base de datos es un elemento indispensable para estimar los tiempos y distancias de recorrido por lo que debe ser actualizada constantemente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la modelización del transporte presenta flujos muy complejos que necesitan de hipótesis y sencillas reglas de diseño para poder simplificar la dificultad asociada a los mismos y ofrecer resultados ajustados a la realidad concreta de cada situación. En este sentido, los algoritmos heurísticos permiten dotar a este tipo de problemas de una sólida base científica y conceptual.

Muchas han sido las aportaciones realizadas sobre la estrategia a seguir en la distribución física de mercancías y en la búsqueda de la ruta óptima. En este sentido, por ejemplo, el cálculo de rutas (*routing*), comprende 6 problemas básicos: el problema del viajante de comercio o TSP (*Traveling Salesman Problem*), el problema del cartero chino o CPP (*Chinese Postman Problem*), el problema de las multirutas de viajeros (m-TSP), el de las rutas de nodos para un almacén y múltiples vehículos, el de rutas de nodos para múltiples almacenes y múltiples vehículos, el problema de rutas de nodos con demandas estocásticas para un depósito y múltiples vehículos, y el del cartero chino con restricciones de capacidad. Cada uno

de estos problemas puede aplicarse a toda una serie de elementos o servicios englobados dentro del ámbito de la distribución de mercancías.

4.2 Justificación de la situación *many to many*

En el presente estudio se ha escogido la situación *many to many* ya que es el modelo que mejor representa la distribución de mercancías mediante el TMCD. Desde una perspectiva global, las mercancías que transporta un buque que ofrece servicios de TMCD tienen, en la mayoría de los casos, orígenes y destinos distintos. Además, como los tráficos TMCD no acostumbran a hacer escalas, el puerto origen y destino de las mercancías de un buque es el mismo para todas ellas. Hay que considerar que el modelo *many to many* permite también que los envíos puedan realizarse mediante TMCD o directamente mediante el modo terrestre puro. Finalmente, dejar constancia que el modelo analizado no analiza el caso *many to many with transshipment* ya que la terminal portuaria no actúa como una auténtica terminal de consolidación de mercancías.

Por estos motivos, como se indica en la Figura 4-1, se ha escogido el modelo *many to many* de distribución de mercancías.

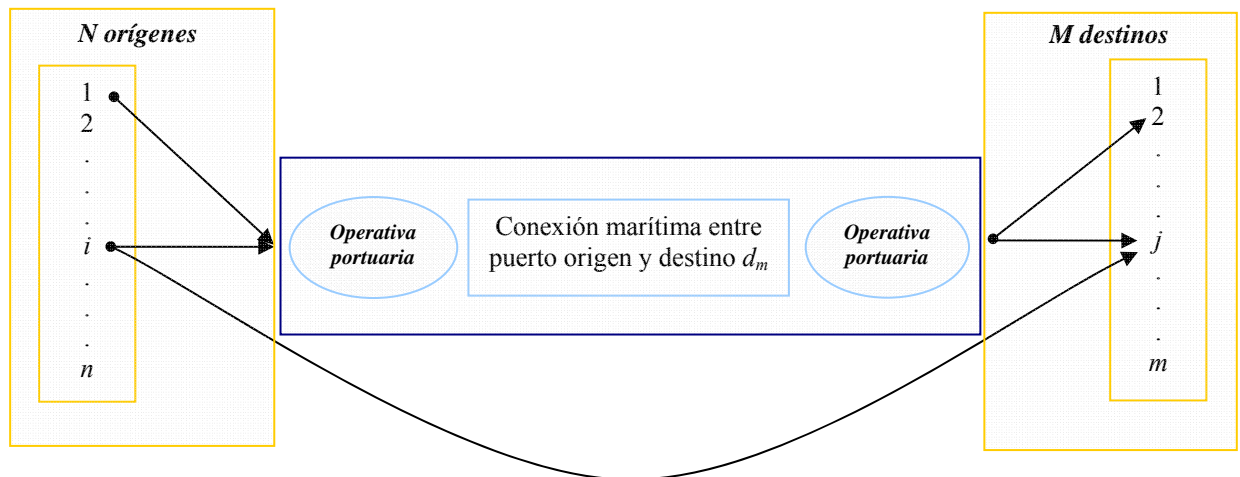


Figura 4-1. Esquema *many to many* planteado.

4.3 Aportaciones sobre el problema

En el presente apartado se recogen las principales aportaciones y trabajos sobre el planteamiento de problemas de muchos orígenes a muchos destinos.

Daganzo (1991) explica la importancia que tiene la utilización de terminales *hub* ya que ello puede suponer una reducción significativa de los costes logísticos. Sin embargo, cuando se trata el problema *one to many* (o viceversa) la existencia de rutas a través de *hubs* sólo se justifica cuando existen restricciones en la longitud de las rutas o en el tamaño de los camiones de distribución.

Por otra parte, Hall (1987) demuestra que, siempre que no existan restricciones temporales, transportar a través de dos terminales es una estrategia atractiva cuando el número de orígenes y destinos es grande. Transportar a través de una sola terminal (como en el presente estudio) es conveniente cuando o bien el número de orígenes es grande o bien el número de destinos es pequeño. Hall (1989) examina varias estrategias simples en las que incorpora nuevos aspectos en el análisis como son: el tiempo necesario para la clasificación y reorganización de la carga, el tiempo que supone viajar por rutas que se desvían mucho de la ruta directa para pasar por la terminal, la necesidad de hacer grupaje en origen o la necesidad de hacer viajes en vacío.

La implementación de la informática en un algoritmo heurístico (Robusté et al., 1996) mostró que para muchas parejas origen/destino no es factible el transporte por rutas que pasen por dos *hubs*, puesto que al desvío respecto a la dirección principal se le añade un doble manejo de la carga con el consumo de tiempo que ello supone. Así, para muchos pares origen/destino sólo será posible transportar la carga a lo sumo por un *hub*, el más cercano al origen o al destino o bien el *hub* que proporcione la distancia mínima. Robusté (2005) plantea también un problema *many to many* en el que permite la posibilidad de hacer *peddling* en origen.

4.4 Formulación del problema

En este capítulo se aborda el problema formado por un conjunto de pares origen/destino asignados a un mismo par de puertos (o ruta marítima) en el que se debe elegir para cada par aquella ruta que minimice el coste total del transporte de mercancías. Sea el conjunto de orígenes $i \in N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ y el conjunto de destinos $j \in M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$. Sea p_{ij} la plataforma o semirremolque que debe transportarse entre el origen i y el destino j , bien sea directamente o mediante el TMCD. En este planteamiento no se considera el caso de hacer parada o *peddling* en origen o destino.

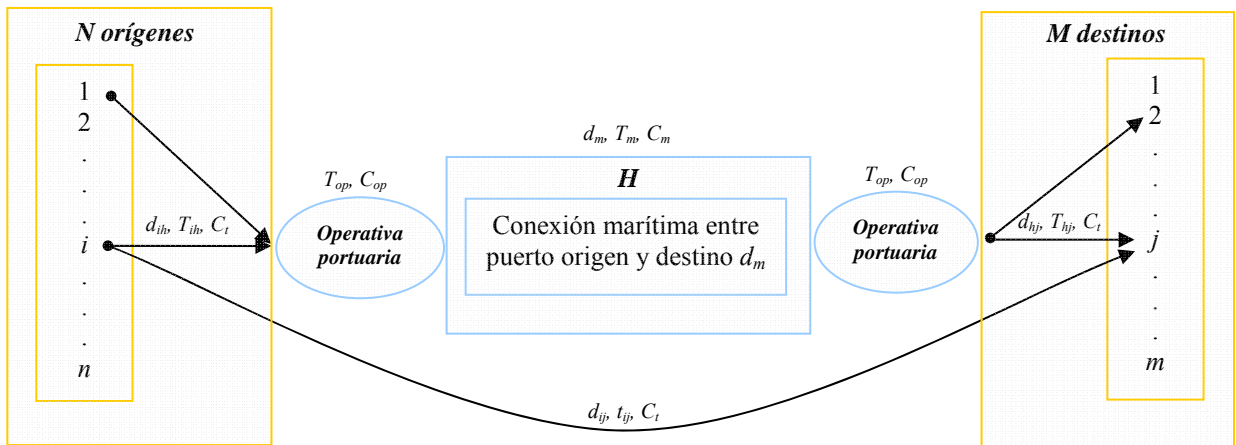


Figura 4-2. Red con n orígenes, m destinos y una conexión portuaria.

La formulación matemática del modelo exige la definición de una serie de variables de decisión:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la plataforma } p_{ij} \text{ va de } i \text{ a } j \text{ directamente por modo terrestre} \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la plataforma } p_{ij} \text{ va de } i \text{ a } j \text{ pasando por el puerto} \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

W_{ih} = Número de camiones del origen i al puerto origen. Este valor es el mismo que el número de plataformas del origen i al puerto origen.

W_{hj} = Número de camiones del puerto destino al destino j . Este valor es el mismo que el número de plataformas del puerto destino al destino j .

W_{ij} = Número de camiones de i a j que realizan el transporte íntegramente por modo terrestre. En el presente estudio se considerará que $W_{ih} = W_{hj}$ ya que todas las plataformas deberán ser distribuidas.

W_h = Capacidad total de los buques ro-ro de la línea TMCD que unen el puerto origen y el puerto de destino expresada en función de su arqueado bruto S .

La nomenclatura seguida para las distancias existentes entre los distintos puntos (orígenes, destinos y el trayecto entre puertos en este caso) del sistema es la siguiente:

d_{ij} = distancia directa terrestre entre el origen i y el destino j (km)

d_{ih} = distancia terrestre entre el origen i y el puerto; es el acarreo terrestre en origen (km)

d_{hj} = distancia terrestre entre el puerto y el destino j ; es el acarreo terrestre en destino (km)

d_m = distancia marítima entre los puertos origen y destino. Será un valor constante para cada grupo de orígenes y destinos (millas)

Por su parte, la nomenclatura seguida para determinar los costes de los distintos tramos de la cadena (tramo terrestre, la operativa portuaria y tramo marítimo) es la siguiente:

C_t = coste unitario kilométrico asociado al tramo terrestres de la cadena (€/h)

C_{op} = coste de la operativa portuaria (€/plataforma)

C_m = coste del tramo marítimo, que incluye el coste de permanencia de una plataforma en el buque, denominado como C_{pb} (€/plataforma)

f_{6a} = coste de inventario asociado a los tramo terrestres de la cadena (€/h)

f_{6b} = coste de inventario asociado a la operativa portuaria (€/h)

f_{6c} = coste de inventario asociado a los tramo marítimo de la cadena (€/h)

α = parámetro que depende del tipo de mercancía para determinar los costes de inventario

r = grado de ocupación del buque

δ = beneficio de la compañía naviera por prestar sus servicios TMCD

Finalmente, se presenta la nomenclatura para definir los tiempos asociados a cada tramo de la cadena logística:

t_{ij} = tiempo invertido en el tramo terrestre entre el origen i y el destino j directamente (h)

t_{ih} = tiempo invertido en el tramo terrestre entre el origen i y el puerto (h)

t_{hj} = tiempo invertido en el tramo terrestre entre el puerto y el destino j (h)

T_{op} = tiempo dedicado a la operativa portuaria (h)

T_m = tiempo de navegación marítima (h)

Además, se asume que la capacidad para los camiones es de una (1) plataforma y para los buques ro-ro, su capacidad viene determinada por la expresión (3-11) que relaciona el número de plataformas n con el arqueado bruto S (en Tm) del buque.

$$n(S) = 1,894S^{0,441} \quad (3-11)$$

o de forma equivalente,

$$S(n) = 0,235n^{2,271} \quad (3-12)$$

Con todo lo anterior, el problema puede formularse mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_t(d_{ij}) + f_{6a}(d_{ij}, \alpha)) W_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n (C_t(d_{ih}) + f_{6a}(d_{ih}, \alpha)) W_{ih} + \\ & + \sum_{j=1}^m (C_t(d_{hj}) + f_{6a}(d_{hj}, \alpha)) W_{hj} + \sum_{i=1}^n (C_{op}(W_{ih}) + f_{6b}(W_{ih}, \alpha)) + \sum_{j=1}^m (C_{op}(W_{hj}) + f_{6b}(W_{hj}, \alpha)) + \\ & + C_m(S, d_m, \alpha, r, \delta) W_h + f_{6c}(W_{ih}, W_{hj}, \alpha) \end{aligned} \quad (4-1)$$

Notar que los términos corresponden, de izquierda a derecha, a:

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_t(d_{ij}) + f_{6a}(d_{ij}, \alpha)) W_{ij} X_{ij} :$	coste asociados a transportes del modo puro terrestre
$\sum_{i=1}^n (C_t(d_{ih}) + f_{6a}(d_{ih}, \alpha)) W_{ih} :$	coste de los acarreos de los orígenes al puerto origen
$\sum_{j=1}^m (C_t(d_{hj}) + f_{6a}(d_{hj}, \alpha)) W_{hj} :$	coste de los acarreos desde el puerto destino a destinos
$\sum_{i=1}^n (C_{op}(W_{ih}) + f_{6b}(W_{ih}, \alpha)) :$	coste de la operativa portuaria en origen
$\sum_{j=1}^m (C_{op}(W_{hj}) + f_{6b}(W_{hj}, \alpha)) :$	coste de la operativa portuaria en destino
$C_m(S, d_m, \alpha, r, \delta) W_h :$	coste del tramo de navegación marítima
$f_{6c}(W_{ih}, W_{hj}, \alpha) :$	coste de inventario del tramo marítimo

Como se puede observar en la expresión (4-1) los costes de inventario, a excepción del marítimo que se ha representado desagregado, se han considerado integrados en cada tramo de la cadena así como el coste de permanencia de una plataforma en el buque, ya que éste último queda incluido en los costes marítimos detallados en la Tabla 3-6.

El problema formulado estará sujeto a las siguientes restricciones:

1. Para cada pareja origen – destino sólo existirá un único modo de transporte (puramente terrestre o mediante TMCD) para distribuir las mercancías. Las expresiones (4-2) y (4-3) expresan esta restricción.

$$\begin{aligned} X_{ij} + Y_{ij} &= 1 & i &= 1, 2, 3, \dots, n \\ & & j &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} X_{ij}, Y_{ij} &\in \{0, 1\} & i &= 1, 2, 3, \dots, n \\ & & j &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-3)$$

2. La suma de camiones, o equivalentemente de plataformas, en origen será inferior o igual a la capacidad total de los buques ro-ro en el puerto origen.

$$\sum_{i=1}^n W_{ih} \leq W_h(S) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4-4)$$

3. La suma de camiones, o equivalentemente de plataformas, en destino será inferior o igual a la capacidad total de los buques ro-ro en el puerto destino.

$$\sum_{j=1}^m W_{hj} \leq W_h(S) \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4-5)$$

A partir de este momento resulta necesario introducir una serie de condiciones y sencillas reglas de diseño orientadas a dotar al problema de un algoritmo que permita obtener una solución al problema planteado.

4.5 Resolución del problema

Existen muchos problemas para los cuales no se conocen algoritmos que puedan encontrar la solución de forma eficiente, como son los problemas NP-completos. Un algoritmo heurístico (o simplemente heurística) puede producir una buena solución, puede que la óptima, pero también puede que no produzca ninguna solución o dar una solución no muy buena. Normalmente, se basa en un conocimiento intuitivo del programador sobre un determinado problema en el que el diseño de reglas sencillas permite dotar al problema de una sólida base matemática y conceptual, por lo que se ha considerado este tipo de algoritmo como el más idóneo para la resolución del problema planteado.

Se denomina heurística al arte de inventar. En programación se dice que un algoritmo es heurístico cuando la solución no se determina de forma directa, sino mediante ensayos, pruebas y reensayos. El método consiste en generar candidatos de soluciones posibles de acuerdo a un patrón dado; luego, los candidatos son sometidos a pruebas de acuerdo a un criterio que caracteriza a la solución. Si un candidato no es aceptado, se genera otro; y los pasos dados con el candidato anterior no se consideran. Es decir, existe inherentemente una vuelta atrás, para comenzar a generar un nuevo candidato. Por esta razón, este tipo de algoritmos también se denominan “con vuelta atrás” (*backtracking*).

Para iniciar la cadena secuencial que permita encontrar una buena solución al problema es necesario fijar una ocupación inicial del buque r_0 . Este paso es necesario para poder determinar, en primera instancia, el coste unitario correspondiente al transporte de una plataforma mediante un modo u otro. Así, la primera decisión que toma el algoritmo es la de comparar el coste del transporte de una plataforma en TMCD C_{ijTMCD} con el del terrestre C_{ijT} para cada pareja origen – destino.

$$\begin{aligned} Si \quad C_{ijTMCD} < C_{ijT} &\Rightarrow X_{ij} = 0 \\ i &= 1, 2, 3, \dots, n \\ j &= 1, 2, 3, \dots, m \\ r &= r_0 \end{aligned} \quad (4-6)$$

donde,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la plataforma } p_{ij} \text{ va de } i \text{ a } j \text{ directamente por modo terrestre} \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

De esta manera, en la matriz X_{ij} se almacena una primera solución del sistema que responde a criterios puramente económicos. A continuación, el algoritmo procede a evaluar la restricción (4-5), mediante la cual se determina la ocupación máxima de los buques. En esta secuencia el algoritmo carga el buque ordenando los pedidos P_{ij} de mayor a menor hasta alcanzar la capacidad total de los buques. Esta condición responde a que, en general, aquellas empresas con mayor volumen de exportación poseen contratos preferentes con las compañías navieras en lo que a reserva de espacio en el buque se refiere. Asimismo, si un cargador se plantea el transporte de una única plataforma de un origen a un destino concreto, el modo que con más probabilidad utilizará será el terrestre gracias a su mayor flexibilidad.

En este sentido, el buque se cargará con aquellos P_{ij} mayores dentro del rango de aquellas mercancías que, respondiendo a criterios estrictamente económicos, sean transportadas mediante TMCD. Además, como el caso que se analiza es el de TMCD mediante camiones que sólo pueden transportar un único semirremolque, una vez cargado el buque se obtendrá una primera aproximación del número de camiones que, partiendo de un origen i , deberán dirigirse al puerto origen. La expresión (4-7) representa el llenado de los buques.

$$\begin{aligned} \hat{W}_{ih} &= \max\{W_{ih}\} \\ \text{Si } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \hat{W}_{ih} Y_{ij} < W_h &\Rightarrow W_{ih} = \left\{ W_{1h}, \dots, W_{nh} \right\} - \hat{W}_{ih} \end{aligned} \quad \begin{aligned} i &= 1, 2, 3, \dots, n \\ j &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-7)$$

donde,

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la plataforma } p_{ij} \text{ va de } i \text{ a } j \text{ pasando por el puerto o } hub \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

W_{ih} = Número de camiones del origen i al puerto origen.

De esta manera, se obtiene una primera configuración de los camiones que deberán cubrir la distancia terrestre entre cada origen i y el puerto origen, almacenando los resultados en la matriz W_{ih} . En este momento, el algoritmo actualiza el valor de la ocupación r con la configuración obtenida en el paso anterior:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ih} Y_{ij}}{W_h} \quad \begin{aligned} i &= 1, 2, 3, \dots, n \\ j &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (4-8)$$

En este punto es preciso volver a la condición (4-6) e introducir como ocupación inicial la obtenida en la expresión (4-8). De esta manera, en el caso que la ocupación de la expresión (4-8) sea mayor que la inicial, el coste unitario del tramo marítimo será menor debido a las economías de escala de los buques y se genera una nueva configuración de resultados.

Consecuentemente, el algoritmo procede a actualizar los valores almacenados en las matrices X_{ij} y W_{ih} mediante las expresiones (4-6) y (4-7).

A continuación se implementa una condición que evalúe y compare el tiempo invertido en el transporte de una unidad de carga en cada modo de transporte. Para lograrlo es necesario introducir un nuevo parámetro en el programa denominado Δt , cuyo significado es el porcentaje máximo de tiempo que la cadena TMCD puede ser más lenta que la puramente terrestre. Por ejemplo, si $\Delta t = 25\%$ y los tiempos de cada una de las cadenas en una ruta concreta donde el transporte, según criterios de coste debe realizarse mediante TMCD ($X_{ij} = 0$), son $T_{TMCD} = 49$ h y $T_C = 40$ h, el algoritmo evalúa la condición $T_{TMCD} < (1 + \Delta t)T_C$, cumpliéndose en este caso la desigualdad planteada ya que $49 < 40 \cdot (1 + 0,25) = 50$. El objetivo de este condicionante es el de proporcionar un parámetro mediante el cual el sea posible fijar la flexibilidad horaria de un modo respecto al otro y decidir cuánto más lento puede ser un modo respecto al otro, independientemente de criterios estrictamente económicos.

La expresión (4-9) representa la condición planteada anteriormente:

$$Si \ X_{ij} = 0 \ \wedge \ T_{ij\ TMCD} < (1 + \Delta t)T_{ij\ C} \Rightarrow X_{ij} = 0 \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{matrix} \quad (4-9)$$

donde,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la plataforma } p_{ij} \text{ va de } i \text{ a } j \text{ directamente por modo terrestre} \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

De esta manera, aquellas rutas TMCD más lentas pasarán directamente al modo terrestre, por lo que de nuevo será necesario actualizar el valor de la ocupación del buque, mediante el procedimiento indicado en las expresiones (4-6), (4-7) y (4-8) hasta que la ocupación inicial y la final sea la misma mediante un proceso iterativo de llenado del buque atendiendo a criterios económicos y de tiempo.

El algoritmo se ha desarrollado mediante Visual Basic implementado en una hoja de cálculo Excel (Anejo 1). En la Figura 4-3 se presenta de forma resumida y simplificada el proceso mediante el cual se determina la solución del problema *many to many* planteado.

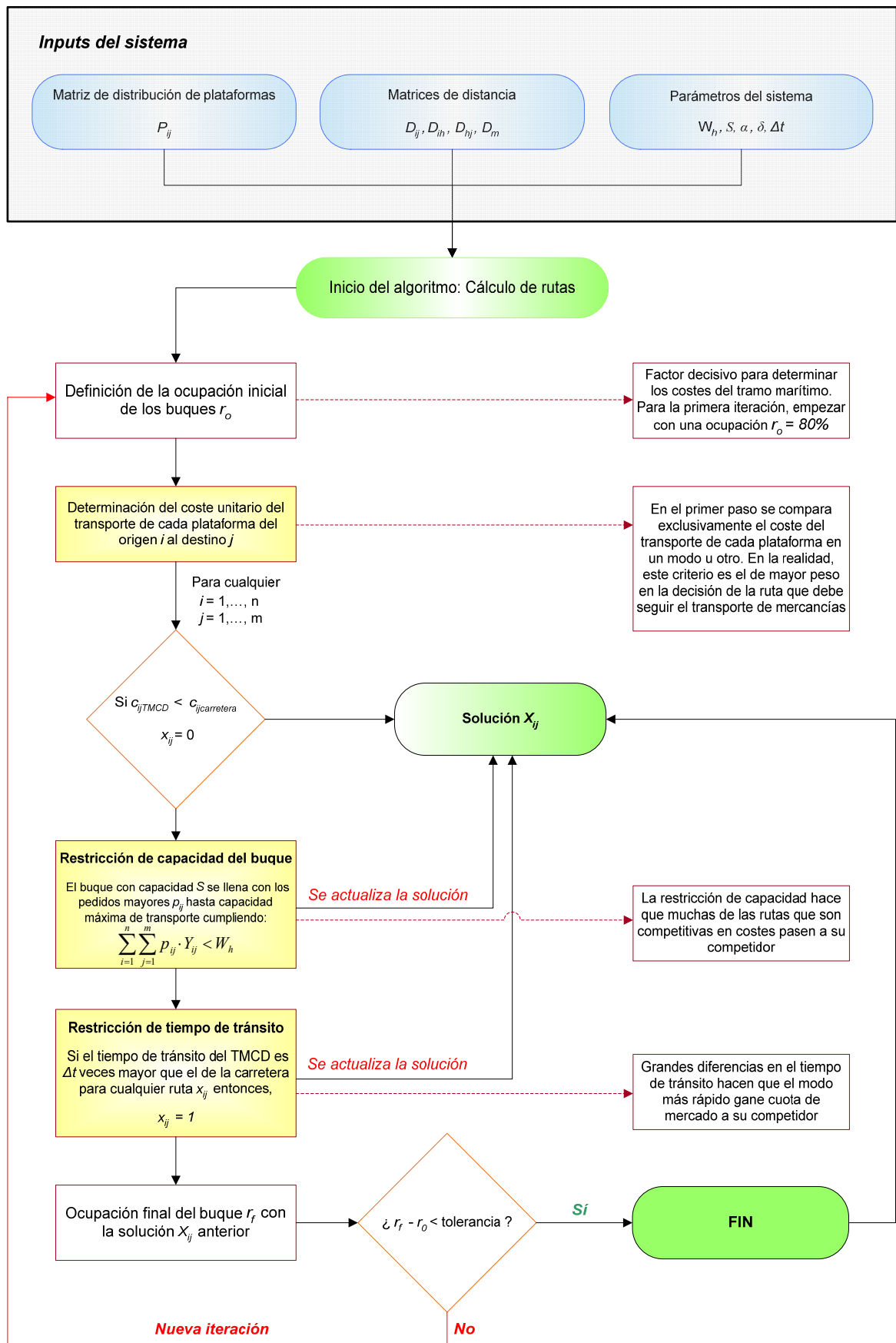


Figura 4-3. Esquema del proceso iterativo para hallar la solución del problema.

5 Validación del modelo. Aplicación a un caso práctico

Una vez diseñado el algoritmo que permite obtener la distribución de plataformas en base a los criterios adoptados, a continuación se propone la aplicación del modelo a un caso práctico. El objetivo de este capítulo consiste en comprobar que el modelo se adecua a la realidad y es de utilidad para explicar correctamente el reparto modal de mercancías entre la carretera y el TMCD.

El caso mediante el que se valida el modelo es el de las relaciones comerciales entre Cataluña e Italia a través de los puertos de Barcelona (Catalunya, España) y el de Civitavecchia (Roma, Italia).

5.1 Rutas de Catalunya a Italia. Validación del modelo

En primer lugar se propone una aplicación práctica del problema planteado, por lo que resulta necesario determinar el conjunto de orígenes y destinos y la mejor o más óptima ruta marítima que los conecta. En este sentido, es plausible pensar que el conjunto de orígenes y destinos estarán ubicados en el hinterland del puerto origen y destino, respectivamente.

El hinterland de un puerto es el espacio terrestre en el que se localizan los lugares de origen o destino de los flujos portuarios. Sus límites dependen de la localización de los establecimientos que envían o reciben mercancías por mar a través de un mismo puerto. Elegir un puerto en lugar de otros depende factores diversos, como por ejemplo los costes del transporte terrestre o la frecuencia de los buques.

En este contexto, el puerto de Barcelona, gracias a su ubicación geoestratégica en el arco mediterráneo y su buena accesibilidad a la red viaria, está desarrollando toda una serie de estrategias con el objetivo de incrementar el número de líneas que ofrezcan servicios portuarios, entre ellos de TMCD. El puerto dispone actualmente de espacios de atraque, carga y descarga dedicados a este modo de transporte y se ha convertido en un punto de referencia para este tipo de tráfico de corta distancia. Además, en el marco de desarrollo de infraestructuras del puerto de Barcelona, se prevé la construcción de una terminal específica de TMCD para el año 2011, lo que sitúa aún más al puerto de Barcelona en clara ventaja respecto a sus competidores más directos tanto en la comunidad catalana (Tarragona, Vilanova i la Geltrú, Palamós y Sant Carles de la Ràpita) como en ámbito estatal.

Durante los últimos años, se han puesto en servicio nuevas líneas de TMCD en el puerto catalán. Después del éxito de la pionera, emprendida por *Grande Navi Veloci*, entre Barcelona y Génova, con crecimientos importantes año tras año, Barcelona ha ido aumentando el número de enlaces con otros puertos mediterráneos, en especial con puertos italianos y del norte de África.

El último ejemplo es la línea puesta en servicio en marzo del 2004 por *Grimaldi Napoli* con Civitavecchia (Roma, Italia). La línea, cubierta por un ferry mixto para pasaje y carga ro-ro, empezó cubriendo el servicio entre el puerto catalán e Italia tres veces por semana y, en la actualidad, ya ofrece un servicio diario (excepto los domingos). Esta ruta se ha consolidado

como una auténtica “autopista del mar”, presentándose claramente competitiva frente a la ruta terrestre. Y, precisamente esta ruta será la escogida para validar el modelo mediante la cual se representará el enlace marítimo entre los orígenes y los destinos del modelo presentado en el capítulo 0.

Con todo lo anterior, la selección de orígenes responderá a caracterizar con suficiente exactitud las relaciones de comercio exterior de la comunidad autónoma de Catalunya con Italia. Por su parte, los destinos representarán prácticamente la totalidad de las principales poblaciones de Italia con el objetivo de analizar, por una parte, la potencialidad de captación de tráfico del puerto de Civitavecchia y, por otra, ofrecer una estimación de cuáles son las relaciones comerciales que, a través de la ruta marítima seleccionada, son rentables desde la óptica del transportista terrestre. Es evidente que si un transportista tiene que transportar una plataforma desde Tarragona hasta el sur de Italia, el puerto origen más conveniente sería el de Tarragona y el de destino Livorno. Sin embargo, obligar a que esta ruta deba realizarse según la cadena Tarragona – Barcelona – Civitavecchia – Sur de Italia ofrece una interesante visión de la potencialidad de captación de la ruta marítima Barcelona – Civitavecchia. Por tanto, el caso práctico debe ser entendido como si la ruta marítima seleccionada fuera la única solución para realizar el transporte en el tramo marítimo de la cadena intermodal de TMCD. Esta simplificación es necesaria dada la complejidad que entrañaría una versión del modelo que permitiera que el algoritmo seleccionara la conexión marítima óptima para cada pareja origen – destino. No obstante, el modelo realizado sí que es muy útil para evaluar la potencialidad que tendría un puerto ubicado en una región donde sólo coexistieran uno o dos puertos comerciales o, como ya se ha indicado, evaluar la competitividad de un puerto sobre su territorio adyacente.

El objetivo de los siguientes apartados es el de justificar la elección de los orígenes y los destinos, así como el resto de variables y parámetros necesarios para la definición del problema propuesto en el capítulo 0 del presente estudio.

5.1.1 El puerto de Barcelona y su hinterland. Elección de los orígenes

Si bien el crecimiento de los tráfico del puerto de Barcelona en los últimos años es un hecho que las estadísticas confirman, se dispone de pocos referentes sobre el alcance terrestre de los mismos. Según Bayrager (2003) el hinterland de Barcelona estaría concentrado básicamente en un área cuyo radio no excedería los 100 km. Además, varios autores (Debie, J. y Guerrero, D., 2006) constatan que aunque no es posible conocer exactamente la estructura de los flujos terrestres del puerto, sí es posible aproximarse a ella mediante un razonamiento basado en el potencial de creación de flujos de transporte marítimo.

Para poder construir una reflexión geográfica sobre este potencial, es necesario analizar la distribución espacial de los lugares de emisión y recepción, seleccionando previamente un cuadro espacial que incluya al menos una parte representativa del hinterland portuario de Barcelona. Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis se ha centrado en el estudio de la comunidad autónoma de Catalunya, que incluiría sobradamente el área identificada de 100 km de radio. Razonando en términos teóricos de potencial de creación de flujos de transporte marítimo y no en términos puramente funcionales, el objetivo es analizar las capacidades de las que dispondrían Catalunya y las principales poblaciones catalanas para absorber los tráfico TMCD del puerto de Barcelona.



Figura 5-1. Imagen del puerto de Barcelona. Fuente: Autoridad Portuaria de Barcelona.

En España, la información relativa al comercio exterior se elabora con finalidades fiscales, permite conocer la cuantía y el valor de las importaciones y exportaciones del país a partir de una malla geográfica relativamente fina (provincias). Sin embargo, su utilización está sujeta a numerosas precauciones, ya que la asignación de los datos de comercio exterior a las provincias obedece a un doble criterio: en primer lugar, la provincia de origen/destino y, como criterio subsidiario, el domicilio fiscal de la empresa. Lo que quiere decir que si la empresa declarante dispone de varios establecimientos, no es posible conocer si la información corresponde al verdadero lugar de origen/destino de la mercancía o al de su sede social. Este efecto “sede social”, tenderá a sobreestimar las provincias que albergan ciudades importantes a nivel nacional, como es el caso de Barcelona.

Teniendo en cuenta que Barcelona no es el único gran puerto comercial de Catalunya y que Tarragona representa un volumen considerable, básicamente de hidrocarburos (más del 60% del tráfico total del puerto de Tarragona en 2003), se ha optado por excluir del análisis la categoría de “combustibles minerales”. En la Tabla 5-1 se recogen los porcentajes de las importaciones y exportaciones agrupados por provincias catalanas, excluyendo la categoría mencionada.

Concepto	Porcentaje sobre Catalunya
Importaciones Barcelona	67,61%
Exportaciones Barcelona	76,94%
Importaciones Girona	1,27%
Exportaciones Girona	1,81%
Importaciones Lleida	0,67%
Exportaciones Lleida	3,63%
Importaciones Tarragona	30,44%
Exportaciones Tarragona	17,62%

Tabla 5-1. Datos de importaciones y exportaciones de Catalunya sin la categoría “combustibles minerales”. Fuente: Agencia Tributaria 2004.

En base a los valores de la Tabla 5-1 es posible la elección de un conjunto de orígenes dentro de la comunidad de Catalunya que responda al monto de exportación e importación

conjuntamente. El número de orígenes seleccionados para la aplicación del caso práctico es 10, repartidos por las provincias catalanas según el peso que tengan dichas exportaciones e importaciones. Así, una vez fijado el número total de orígenes es posible definir el número de orígenes en cada una de las provincias multiplicando por el peso que representan conjuntamente las importaciones y las exportaciones:

Provincia	Peso ponderado por imp. y exp.	Número de orígenes por provincia
Barcelona	72,28%	6
Girona	1,54%	1
Lleida	2,15%	1
Tarragona	24,03%	2

Tabla 5-2. Datos de importaciones y exportaciones de Catalunya sin la categoría “combustibles minerales”. Fuente: Agencia Tributaria 2004.

Como se puede observar en la Tabla 5-2, para las provincias de Lleida y Girona se ha adoptado un origen para cada una de ellas a pesar de que, respondiendo exclusivamente al porcentaje de importación y exportación, no debería haberse considerado ninguno pero el efecto “sede social” puede ser muy importante en este caso. Esta consideración responde estrictamente a intentar representar con el modelo, como mínimo, cada una de las capitales de provincia consideradas en el estudio.

Hay que tener en cuenta que la repartición terrestre de los flujos de transporte marítimo no es independiente de otras estructuras espaciales clásicas como la distribución de la población en el territorio. Y precisamente en este sentido es como se seleccionarán las poblaciones dentro de cada provincia catalana. El número de orígenes de la Tabla 5-2 se traducirá en poblaciones dentro de la provincia en función de su población.

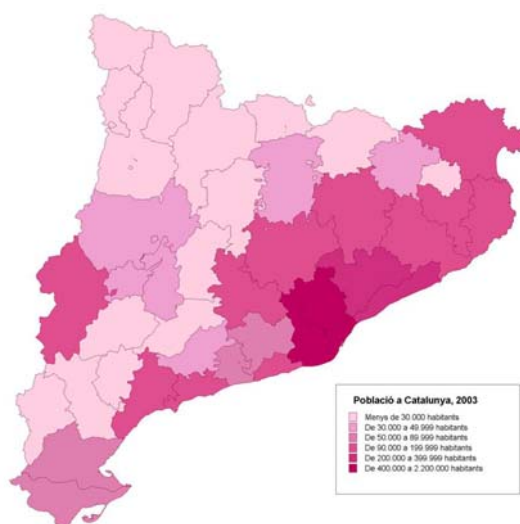


Figura 5-2. Densidad de población por ámbito comarcal en Catalunya. Fuente: IDESCAT, 2003.

En base a los datos del Instituto de Estadística de Catalunya (2005), los principales núcleos poblacionales agrupados por provincias catalanas son los indicados en la Tabla 5-3.

Provincia	Poblaciones	Habitantes	Ranking respecto Catalunya	Origen <i>i</i>
Barcelona	Barcelona	1593.075	1	1
	L'Hospitalet de Llobregat	252.884	2	2
	Badalona	218.553	3	3
	Sabadell	196.971	4	4
	Terrassa	194.947	5	5
	Santa Coloma de Gramanet	118.129	8	6
Girona	Girona	86.672	11	7
Lleida	Lleida	124.709	7	8
Tarragona	Tarragona	128.152	6	9
	Reus	99.505	10	10

Tabla 5-3. Conjunto de orígenes seleccionados. Fuente: IDESCAT, 2005.

De los datos de la Tabla 5-3 destaca el hecho de que las ciudades seleccionadas, a excepción de Mataró, que ocuparía el noveno puesto como ciudad más habitada pero debido al criterio adoptado no entra en la selección, las demás ocupan su puesto como origen seleccionado. Es decir, si el criterio adoptado para la selección de orígenes hubiera sido únicamente el tamaño de la población, la selección hubiera sido la misma cambiando Girona por Mataró. De esta manera, quedan seleccionados los orígenes que se introducirán en el modelo.

5.1.2 El puerto de Civitavecchia. Elección de los destinos

Gracias a su posición en el centro de la península itálica, el puerto de Civitavecchia constituye la principal conexión marítima de Roma, ya que está ubicado a tan sólo 80 km de la capital italiana. Este puerto forma parte del denominado Puerto de Roma, conjunto formado por las Autoridades Portuarias de Civitavecchia, Fiumicino y Gaeta.

En comparación con el puerto de Barcelona, el puerto italiano movió durante el 2005 un volumen aproximado de 11 millones de toneladas de mercancía, lejos de las más de 40 millones de toneladas movidas por el puerto catalán.



Figura 5-3. Imagen del puerto de Civitavecchia. Fuente: Puerto de Roma.

En materia de TMCD, el Boletín Oficial de la República Italiana publicó el pasado 7 de junio de 2006 la ley que regula el denominado “ecobono” y que establece incentivos económicos para los transportistas que embarquen sus camiones o semirremolques en barcos que cubran trayectos alternativos a la carretera. Este incentivo se aplica como descuento en el precio del billete. El presupuesto disponible es de 20.000.000 € a repartir en quince años. El ecobono se distribuirá mediante un reembolso anual en función de los viajes efectuados y hasta un máximo del 20% del coste del billete en las líneas marítimas existentes o del 30% en nuevas líneas a promocionar.

Para solicitar el incentivo, los transportistas tendrán que efectuar un mínimo de 80 viajes en cada línea y obtendrán un mayor incentivo los que hagan más de 1.800 viajes. Las empresas que recibirán el ecobono tendrán que comprometerse a mantener el mismo volumen de tráfico en los tres años siguientes. Esta ley tiene especial importancia en el momento en que los viajes con origen en Italia y destino en España, pueden verse beneficiados de este descuento, con lo que se favorece la solución intermodal del transporte de mercancías.

En cuanto a la determinación de los destinos para la aplicación del caso práctico, el objetivo de la selección realizada consiste en analizar precisamente la competitividad del puerto de destino y dar validez al modelo. Como se indicaba en la introducción de este capítulo, la elección de destinos responde a representar mediante una única conexión marítima la máxima representatividad de poblaciones italianas cercanas al puerto de Civitavecchia. De esta manera, el criterio de selección se ha basado en el análisis poblacional de los destinos italianos en un radio inferior a 600 km del puerto italiano que, como se ha visto en el apartado anterior, es suficiente para garantizar que la selección representa con suficiente exactitud las regiones italianas con más comercio exterior (importaciones y exportaciones).

Región	Poblaciones	Habitantes	Ranking respecto Italia	Destino j
Lazio	Roma	2.847.677	1	1
Campania	Nápoles	984.242	3	2
Sicilia	Palermo	670.820	5	3
Emilia-Romagna	Bologna	373.743	7	4
Toscana	Florenia	366.901	8	5
Apulia	Bari	326.915	9	6
Apulia	Taranto	194.000	-	7
Umbría	Perugia	157.718	-	8
Apulia	Foggia	154.742	-	9
Umbría	Terni	109.613	-	10

Tabla 5-4. Conjunto de destinos seleccionados. Fuente: ISTAT, 2006.

Como se desprende de la Tabla 5-4, las poblaciones seleccionadas están ubicadas mayoritariamente en la parte centro – sur de Italia. A continuación se establecerá el criterio para seleccionar la cantidad de mercancías a distribuir.

5.1.3 Determinación del flujo de mercancías. Matriz P_{ij}

Para realizar una estimación del volumen de mercancías que es necesario asignar a la matriz P_{ij} , que representa el número de semirremolques que deben ser transportados de los orígenes i

a los destinos j , resulta imprescindible realizar primeramente un análisis de la situación actual del transporte de mercancías entre Catalunya e Italia para, posteriormente, obtener los valores de la matriz de resultados X_{ij} , que representa el reparto modal de mercancías.

5.1.3.1 Análisis del sector del transporte de mercancías entre Catalunya e Italia

En primer lugar, la política de transportes de la Generalitat de Catalunya tiene como principal objetivo conseguir una movilidad coherente con el crecimiento económico de la región pero que éste sea sostenible. La sostenibilidad debe significar un respeto al medio ambiente, un respeto a las personas y una mayor cohesión de las redes de transporte transeuropeas. Esta política lleva directamente a considerar al TMCD como una de las principales alternativas para la reducción de tráfico por carretera a través de los Pirineos y, de esta manera, contribuir a la reducción de congestión, accidentes, ruido y contaminación atmosférica. El modelo existente de concentración del aumento de tráfico a través del paso de la Jonquera (Girona, Catalunya) no es sostenible ni se puede admitir porque perjudica claramente los intereses generales de la sociedad. Será precisamente este enclave viario, el paso de la frontera francesa por la Jonquera, el punto de partida para determinar el flujo de mercancías entre Catalunya e Italia.

En este punto del estudio, es de especial interés obtener una estimación del número de semirremolques con origen en Catalunya y destino Italia, por lo que se ha desarrollado una metodología para conseguirlo, la cual tiene como punto de partida el número de camiones que cruzan la frontera francesa en dirección hacia Francia.

En base a los datos del Observatorio hispano – francés de Tráfico en los Pirineos del 2004, la IMD de pesados (en ambos sentidos) en la Jonquera fue de 9.041 y la de Puigcerdà de 299. Según estimaciones del propio Observatorio, por la AP-7, principal autopista que comunica Catalunya con Francia vía Girona, circulan en sentido hacia Francia unos 4.394 camiones a diario. De este dato resultaría muy interesante conocer cuál es la proporción de estos vehículos cuyo origen es Catalunya y su destino Italia.

Según la información disponible en el Boletín Económico de Información Comercial Española (ICE) del 2005, con datos de la Subdirección General de Estudios sobre el Sector Exterior y la Competitividad, el comercio exterior catalán representó un 26,6% del valor de las exportaciones y un 29,9% del total de las importaciones españolas. En este sentido se tomará, como primera aproximación, que del total de camiones que circulan por la frontera francesa, un 26% de ellos tiene su origen en Catalunya.

Por otra parte, según la Secretaría de Estado de Turismo y Comercio en base a los datos de la Dirección General de Aduanas correspondientes al periodo enero – septiembre del 2006, el valor de las exportaciones de Catalunya a Italia representa un 17,58% del total de exportaciones a países de la Unión Europea. En consecuencia, se puede tomar como hipótesis que del total de camiones que cruzan la frontera por el paso de la Jonquera, un 18% tiene como destino Italia.

De este modo, se obtiene que a diario, 206 camiones con origen en Catalunya se dirigen a Italia mediante el modo puramente terrestre. Según datos de la Dirección General de Aduanas, el peso medio de los semirremolques es aproximadamente de 14 toneladas, por lo que se

puede asumir que cada una de las cabezas tractoras lleva consigo un semirremolque o plataforma de transporte, ya que según el *Informe de avance del Short Sea Shipping* (Asociación Española de Promoción del Short Sea Shipping, 2004) el peso medio de las plataformas es de 13,5 toneladas, muy similar al primero.

A esta cifra, es necesario sumar aquellas mercancías que transporta el modo marítimo. Según datos públicos del Eurostat¹², del total de mercancías que se transportan de España a Italia, la cuota de mercado de la carretera es del 61,7%, la del transporte marítimo es del 37,6% y la del ferrocarril es de un 0,7%. En este sentido, sería necesario añadir 126 plataformas procedentes del transporte marítimo que, junto a las 206 del transporte terrestre, resulta un flujo de 332 semirremolques/día con origen en Catalunya y destino Italia.

5.1.3.2 Asignación de valores a la matriz P_{ij}

Una vez determinado el número de semirremolques con origen en Catalunya y destino Italia, es necesario determinar de qué modo se asignan a la matriz P_{ij} . El criterio adoptado en el estudio para cualquier elemento p_{ij} de la matriz resulta del cálculo indicado en la expresión (5-1):

$$p_{ij} = \Omega_{ij} \cdot P \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{matrix} \quad (5-1)$$

donde,

p_{ij} = plataformas con origen i y destino j
 Ω_{ij} = peso de reparto poblacional de mercancías
 P = número de plataformas totales

El coeficiente Ω_{ij} de la expresión (5-1) se calcula como el peso de la población i respecto a la suma del total de los orígenes multiplicado por el peso del destino j respecto a la suma total de los destinos como indica la expresión (5-2)

$$\Omega_{ij} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \cdot \frac{p_j}{\sum_{j=1}^m p_j} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{matrix} \quad (5-2)$$

donde,

p_i = población del origen i
 p_j = población del destino j

De esta manera, se obtienen los coeficientes p_{ij} de la matriz para iniciar el caso práctico. Los valores obtenidos, que se detallan en la Tabla 5-5, corresponden a plataformas diarias con

¹² Statistical Office of the European Communities (Eurostat), oficina estadística de las Comunidades Europeas. Es la oficina estadística de la Comisión Europea que produce datos sobre la Unión Europea y promueve la armonización de los métodos estadísticos de los estados miembros.

origen en Cataluña y destino Italia. Más adelante se especificará el número de días que comprenderá el análisis con el objeto que, como mínimo, al menos una (1) plataforma sea transportada desde cualquier origen a su destino y más de un (1) buque ro-ro pueda operar en el horizonte temporal analizado.

P_{ij} (plataformas/día)		Destinos j									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Orígenes i	1	80,8	27,9	19,0	10,6	10,4	9,3	5,5	4,5	4,4	3,1
	2	12,8	4,4	3,0	1,7	1,7	1,5	0,9	0,7	0,7	0,5
	3	11,1	3,8	2,6	1,5	1,4	1,3	0,8	0,6	0,6	0,4
	4	10,0	3,5	2,4	1,3	1,3	1,1	0,7	0,6	0,5	0,4
	5	9,9	3,4	2,3	1,3	1,3	1,1	0,7	0,5	0,5	0,4
	6	6,0	2,1	1,4	0,8	0,8	0,7	0,4	0,3	0,3	0,2
	7	4,4	1,5	1,0	0,6	0,6	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2
	8	6,3	2,2	1,5	0,8	0,8	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2
	9	6,5	2,2	1,5	0,9	0,8	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3
	10	5,1	1,7	1,2	0,7	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2

Tabla 5-5. Matriz de distribución de mercancías diarias P_{ij} de la validación.

No en vano, indicar que $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} = P$ (332, el total de semirremolques) y que para $i = \hat{i}$,

$\sum_{j=1}^m p_{\hat{i}j}$ representa el número de semirremolques con origen en la población \hat{i} . De esta forma, se puede analizar rápidamente cuál es el volumen de mercancías asociado a cada origen. Análogamente, sirve el mismo comentario si la suma la realizamos por columnas, obteniendo entonces el volumen de mercancías de cada destino.

5.1.4 Inputs del sistema Cataluña – Italia

Una vez determinado el flujo de mercancías se está en condiciones de asignar valores a los distintos parámetros del sistema planteado. En primer lugar, se asignarán valores a las matrices de distancia, el número de buques que prestarán servicios TMCD y los demás parámetros del problema.

5.1.4.1 Matrices de distancia (D_{ij} , D_{ih} , D_{hj} y D_m)

En primer lugar es necesario obtener la matriz D_{ij} que representa la distancia terrestre directa entre cualquier origen i y destino j . En la Tabla 5-6 se representan las distancias terrestres directas existentes entre los orígenes y destinos seleccionados.

D_{ij} (km)		Destinos j									
		Roma	Nápoles	Palermo	Bologna	Florenia	Bari	Taranto	Perugia	Foggia	Terni
Orígenes i	Barcelona	1362,6	1556,4	2260,1	1139,2	1088,1	1788,0	1877,1	1255,6	1688,8	1312,0
	L'Hospitalet de Llobregat	1368,7	1562,6	2266,1	1145,9	1094,2	1793,7	1882,4	1261,2	1694,2	1319,0
	Badalona	1359,5	1559,6	2263,1	1136,0	1091,2	1789,6	1874,2	1252,4	1685,8	1308,3
	Sabadell	1358,4	1152,0	2254,2	1136,5	1085,5	1785,5	1874,5	1253,5	1684,1	1308,7
	Terrassa	1365,7	1558,8	2264,5	1141,2	1091,5	1791,3	1880,0	1258,2	1691,5	1317,2
	Sta. Coloma de Gramanet	1354,7	1548,7	2252,1	1130,6	1080,5	1781,2	1870,1	1248,8	1680,2	1303,4
	Girona	1268,2	1462,0	2165,8	1044,8	993,8	1693,7	1782,8	1161,2	1594,8	1217,6
	Lleida	1518,2	1712,0	2415,8	1294,8	1243,8	1943,6	2032,7	1411,2	1844,4	1467,6
	Tarragona	1452,7	1646,6	2350,3	1229,3	1178,3	1878,2	1967,3	1345,7	1778,9	1402,1
	Reus	1461,9	1656,2	2359,5	1238,4	1188,2	1887,5	1977,2	1356,2	1788,1	1411,8

Tabla 5-6. Matriz de distancias terrestres directas D_{ij} del caso nº 1. Fuente: www.mappy.com

Por otra parte, también es necesario definir las matrices que conectan de forma terrestre los orígenes y los destinos con el puerto o ruta marítima seleccionada. Se trata de las matrices D_{ih} (Tabla 5-7) y D_{hj} (Tabla 5-8) que representan el acarreo en origen y el acarreo en destino, respectivamente.

D_{ih} (km)		Acarreo al puerto origen
		Puerto de Barcelona
Orígenes i	Barcelona	2,5
	L'Hospitalet de Llobregat	8,3
	Badalona	10,7
	Sabadell	26,2
	Terrassa	33,4
	Sta. Coloma de Gramanet	10,7
	Girona	103,3
	Lleida	177,9
	Tarragona	99,9
	Reus	108,3

Tabla 5-7. Matriz de distancias terrestres asociadas al acarreo en origen D_{ih} . Fuente: www.mappy.com.

Como se puede observar en la Tabla 5-7, los acarreos en origen son, en todos los casos, inferiores a 180 km. A partir de la expresión (3-3), que relaciona la distancia terrestre con el tiempo dedicado al acarreo, se desprende que el tiempo máximo de acarreo en origen será de 4,2 h.

$D_{hj} \text{ (km)}$		Acarreo desde el puerto destino
		Puerto de Civitavecchia
Orígenes i	Roma	85,2
	Nápoles	297,2
	Palermo	1000,9
	Bologna	389,9
	Florenia	286,3
	Bari	528,8
	Taranto	617,9
	Perugia	183,2
	Foggia	466,2
	Terni	114,4

Tabla 5-8. Matriz de distancias terrestres asociadas al acarreo en destino D_{hj} . Fuente: www.mappy.com.

En el caso de los acarreos en destino, el tiempo dedicado al acarreo aumenta ya que las distancias de las poblaciones seleccionadas respecto al puerto de Civitavecchia son mayores que en el caso del puerto de Barcelona. A priori, esta circunstancia no debe significar que parte de las rutas X_{ij} pasen al modo puramente terrestre como se demostrará en los siguientes apartados. Además, la ubicación de los destinos en la parte central – sur de Italia no supone ningún handicap para el TMCD ya que, si por ejemplo los destinos hubieran estado situados en el norte de Italia, la ruta intermodal sí que cargaría con un aumento de la distancia recorrida total con el consiguiente aumento de tiempo y costes.

Por otra parte, la distancia marítima existente entre el puerto de Barcelona y el de Civitavecchia, necesaria para definir el problema, es de 450 millas. Según el estudio *Promoción del short sea shipping en el arco Atlántico* (Puertos del Estado, 2005) la distancia mínima aconsejable para asegurar la rentabilidad de un servicio TMCD es de 400 millas, por lo que la ruta marítima seleccionada cumple la premisa mencionada.

5.1.4.2 Número y capacidad de los buques seleccionados (W_h , S)

En primer lugar, dado que el principal objetivo de esta apartado consiste en dar validez al modelo planteado, el número de buques W_h seleccionados será de 6, número que representará la frecuencia actual del servicio TMCD entre el puerto de Barcelona y Civitavecchia en una semana habitual.

Por otra parte, la capacidad del buque seleccionado será la del *Eurostar Barcelona*, propiedad del grupo Grimaldi Nápoles y que operan en la línea Barcelona – Civitavecchia. Este buque, con 212 m de eslora, 25 m de manga y 6,8 m de calado, tienen un arqueo bruto de 30.860 GT, uno de los mayores de los buques que operan con servicios TMCD en todo España. Este arqueo supone, según la expresión (3-11) definida en el apartado 0, una capacidad máxima para 180 plataformas.

Símbolo	Concepto	Magnitud
W_h	Número de buques	6
S	Arqueo bruto (GT)	30.860
Pl	Plataformas	180

Tabla 5-9. Valores para caracterizar el servicio TMCD.

5.1.4.3 Coste de inventario, beneficio de la naviera y diferencia de tiempo entre cadenas de transporte

Como se describe en el apartado 4.4 del presente estudio, resulta necesario asignar valores al resto de variables que describen el modelo para la completa y correcta definición del problema planteado.

El primero de ellos es el valor del coeficiente α . Este coeficiente representa el coste de inventario de la mercancía, expresado en €/h, y depende únicamente del tipo de mercancía y del tiempo de tránsito de la misma. Cuanto mayor sea el tiempo de tránsito de una mercancía en un modo de transporte (carretera pura o TMCD), mayor será el coste de inventario del transporte en ese modo en concreto. Como se demostrará más adelante, el tiempo de tránsito de las mercancías en el dominio estudiado (Catalunya – Barcelona – Civitavecchia – Centrosur Italia), es muy similar en ambos modos de transporte pero, por lo general, la solución intermodal resulta algo más lenta que la carretera pura. Esta circunstancia conlleva una penalización al modo de transporte que sea más lento ya que, en base al modelo propuesto, el algoritmo procede en su primer paso a la comparación del coste unitario del transporte de una sola plataforma. Sin embargo, debido a la poca diferencia de tiempo entre ambos modos en las rutas planteadas esta circunstancia afectará levemente a la solución final.

Para determinar el valor del coeficiente α (€/h), es imprescindible analizar qué tipo de mercancías intercambian las regiones estudiadas. En base a datos del informe *Análisis, previsiones y contraste de tráfico para cada puerto y el conjunto del sistema portuario español para el año 2001 y los años horizontes 2004 y 2006* (Ministerio de Fomento, 2001), los principales intercambios entre Italia y las comunidades de Catalunya y Aragón¹³ en el 1999 fueron de materiales plásticos, caucho y sus manufacturas. Además, según las previsiones del citado informe se prevé un crecimiento del 15,4% anual, pasando de las 487.603 toneladas en el 1999 hasta las 2.350.000 toneladas previstas para el 2010. Sin embargo, el mapa industrial italiano de este tipo de materiales se concentra en las regiones del norte del país, por lo que no resulta adecuado caracterizar la demanda de transporte con este tipo de mercancías en la aplicación práctica propuesta. Por este motivo y asumiendo que la metodología para la determinación de los destinos utilizada cruza datos de comercio con población, es razonable plantear que el tipo mercancía más adecuado para la aplicación práctica sean este tipo de productos. De esta manera se tomarán los productos que ocupan el segundo lugar en intercambios de Catalunya y Aragón e Italia, que es el grupo formado por máquinas, aparatos y material eléctricos.

¹³ Los datos del informe del Ministerio de Fomento (2001) ofrece los datos para Cataluña y Aragón de forma agregada.

Este tipo de mercancías presenta un coste de inventario menor al que podrían tener, por ejemplo, productos del reino animal o vegetal (que ocupan el segundo puesto a nivel de intercambios entre España – Italia) y los productos perecederos en general. El coste de inventario para el tipo de productos seleccionados podría obtenerse según el coste asociado al almacenamiento de este tipo de productos. A diferencia de los productos perecederos, los aparatos electrónicos no pierden su valor debido a retrasos o inconveniencias en su distribución, sino que las partidas que contribuyen de forma más importante en el coste de inventario final son su almacenamiento y mantenimiento.

Según *Barcelona en cifras* (Ajuntament de Barcelona, 2005), estudio realizado por las principales consultoras inmobiliarias internacionales, el precio medio de alquiler de las naves industriales en Barcelona es de 7,15 €/m²/mes. Asumiendo que las medidas de un semirremolque son 2,5 m de anchura por 12, 5 m de largo, se obtiene que el precio de almacenamiento de un semirremolque es aproximadamente de 0,32 €/h¹⁴. La partida correspondiente al mantenimiento de las mercancías de este grupo será también pequeña, ya que este tipo de productos no requiere de almacenes especiales (frigoríficos, asilamientos térmicos, etc.) para el correcto mantenimiento de los mismos. Tomando la hipótesis que el mantenimiento significa a lo sumo un 30% del coste de almacenamiento, el valor del parámetro α para el caso que nos ocupa será de 0,41 €/h.

El segundo parámetro necesario para definir la aplicación práctica planteada es el porcentaje de beneficio de la compañía naviera por prestar sus servicios TMCD, representado por el coeficiente δ . Como se indicaba en el análisis de sensibilidad de la formulación de costes (ver apartado 3.6.2), asumir que un beneficio de las compañías navieras del 15% se ajusta notablemente a aquello que los transportistas pagan como flete por el trayecto marítimo de la cadena. Hay que remarcar que en dicho análisis de sensibilidad se tomaba como representativo un buque de 10.000 GT, tres veces inferior al *Eurostar Barcelona*, por lo que resulta necesario realizar de nuevo la comparación flete – costes marítimos para estimar el valor del coeficiente δ .

En el caso particular de la línea Barcelona – Civitavecchia, la comparación del coste del flete (764 €) con el coste asociado al tramo marítimo y de operativa de la cadena para distintos valores de ocupación del buque y del coeficiente δ se detallan en la Figura 5-4.

¹⁴ Se puede considerar que el factor apilamiento es despreciable ya que el semirremolque trata fundamentalmente el grupaje de mercancías.

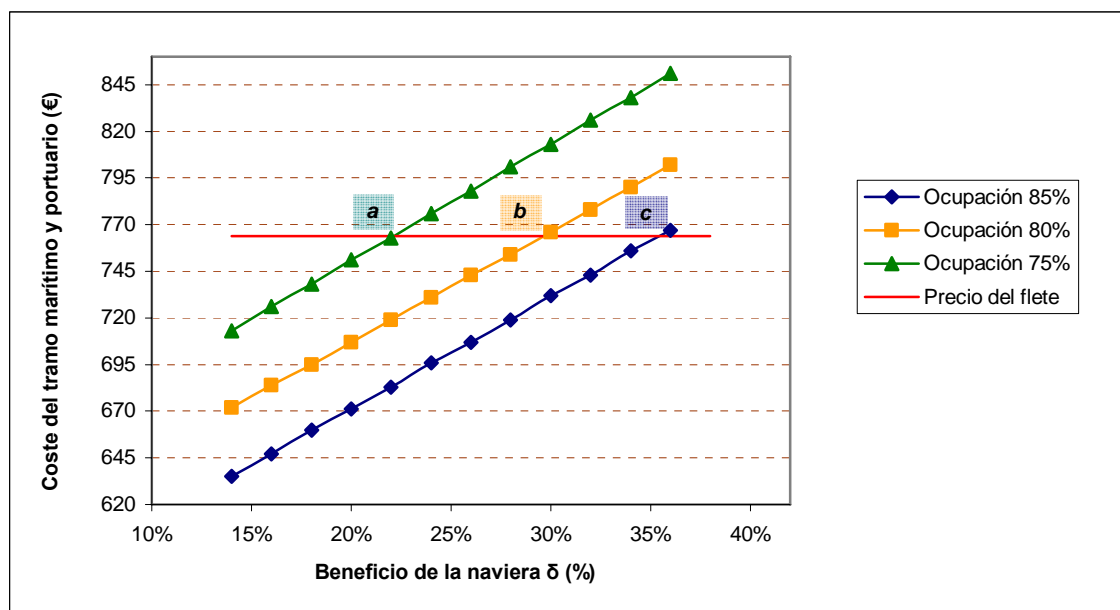


Figura 5-4. Comparación del precio del flete con los costes del tramo marítimo y de operativa portuaria en función de la ocupación del buque y el beneficio de la naviera.

Como se puede observar en la Figura 5-4, para las ocupaciones seleccionadas, existen tres situaciones en las que el precio del flete es igual al coste del tramo marítimo más el beneficio de la compañía naviera. En la situación a), para una ocupación del 75% del buque, se obtiene que para equiparar costes más beneficio de la naviera con el precio del flete, el beneficio de ésta es de un 22%. En la situación b), para una ocupación del 80%, el valor del coeficiente δ es del 29% y, en la situación c), para una ocupación del 85%, el valor de δ es de un 35% de beneficio. Con este análisis se demuestra que, dado que el precio del flete es constante para el caso estudiado, a medida que aumenta la ocupación del buque los costes marítimos disminuyen (economías de escala) por lo que el beneficio que puede obtener la compañía naviera crece. Atendiendo al hecho que la línea Barcelona – Civitavecchia ha pasado de tres a seis servicios semanales en 2 años, se podría pensar que la línea es muy rentable para el armador, por lo que presumiblemente los beneficios de la compañía se sitúan entorno al 25-30%. En este sentido, la realidad demuestra el alto grado de monopolio que constituyen las navieras (especialmente las italianas) en el arco mediterráneo, por lo que en el modelo se tomará la hipótesis que el beneficio de la naviera es del 25% por unidad transportada.

El tercer y último parámetro que queda por definir es el parámetro de decisión denominado Δt cuyo significado es el porcentaje máximo de tiempo que la cadena TMCD puede ser más lenta que la puramente terrestre. Este parámetro fue diseñado con el objetivo de introducir un elemento que pudiera descartar algunas rutas por exceder en tiempo de tránsito total de un modo respecto al otro. En la actualidad, las empresas de transporte normalmente aceptan los pedidos en los que la mercancía debe ser recogida en 24 horas. Como el promedio de los tiempo para cubrir la distancia terrestre directa entre las poblaciones origen y destino es de 41,1 horas y el tiempo promedio de la cadena TMCD para todas las rutas es de 43,2 horas, el Δt será de estricto, es decir, aquellas rutas en las que el TMCD supere un 10% el tiempo de tránsito de la carretera, serán descartadas y pasarán directamente a la carretera. Este parámetro viene a representar la exigencia en cuanto a flexibilidad horaria del TMCD respecto a la carretera. Obviamente, este parámetro podría llegar al 50% de diferencia, debido a la lentitud del transporte marítimo, pero el TMCD debe plantearse como una alternativa real y competitiva al clásico transporte de mercancías por carretera.

En la Tabla 5-10 se resumen los parámetros seleccionados para la aplicación del caso práctico entre poblaciones de Catalunya e Italia.

Símbolo	Concepto	Magnitud
α	Coste de inventario	0,41 €/h
δ	Beneficio de la naviera	25%
Δt	Diferencial de tiempo entre cadenas de transporte	10%

Tabla 5-10. Parámetros de diseño del sistema.

5.1.5 Resultados de la validación

Aplicando el modelo al caso planteado, a continuación se resumen los principales resultados y se contrastan con las hipótesis formuladas para dar validez al modelo planteado. Se analizarán la cuota de mercado de cada modo de transporte, los costes, tiempos de recorrido y distancias de cada uno de ellos en función de los parámetros de diseño adoptados.

5.1.5.1 Cuota de mercado de la carretera en relación al TMCD

En base a las hipótesis de flujo de semirremolques de Catalunya a Italia, un total de 1.992 semirremolques se han introducido en el modelo repartidos según el peso de cada ruta respecto al total de intercambios comerciales entre ambas regiones (ver apartado 5.1.3). Este valor representa el flujo de semirremolques en una semana habitual de Catalunya a Italia

De las 100 rutas planteadas, un total de 93 utilizan la carretera como modo de transporte de las mercancías, resultado que traducido en número de semirremolques representa 1.034 semirremolques, aproximadamente un 52% del total. Esto significa que un 48% del total de mercancías son transportadas mediante TMCD, valor 10 puntos por encima que el valor estimado por el Eurostat acerca el transporte de mediante el modo marítimo de Catalunya a Italia. Esta diferencia se puede explicar debido a que el buque seleccionado dispone de una capacidad muy superior a los buques que ofrecen servicios TMCD. En la Figura 5-5 se detallan los resultados obtenidos con los valores introducidos en el modelo comparados con los de la fuente citada anteriormente.

Es importante destacar el efecto polarizador que ejercen las ciudades de Barcelona y Roma en el problema planteado. Las mercancías con origen en Barcelona y destino a Italia representan un 53% del total de plataformas transportadas, de las cuales un 73% utilizan el TMCD. Por su parte, Roma capta el 46% del total de las plataformas transportadas, de las cuales un 61% son transportadas mediante TMCD. Esta circunstancia podría explicar el porqué de la ubicación de grandes centros logísticos e intermodales en las cercanías de grandes ciudades como son Barcelona y Roma.

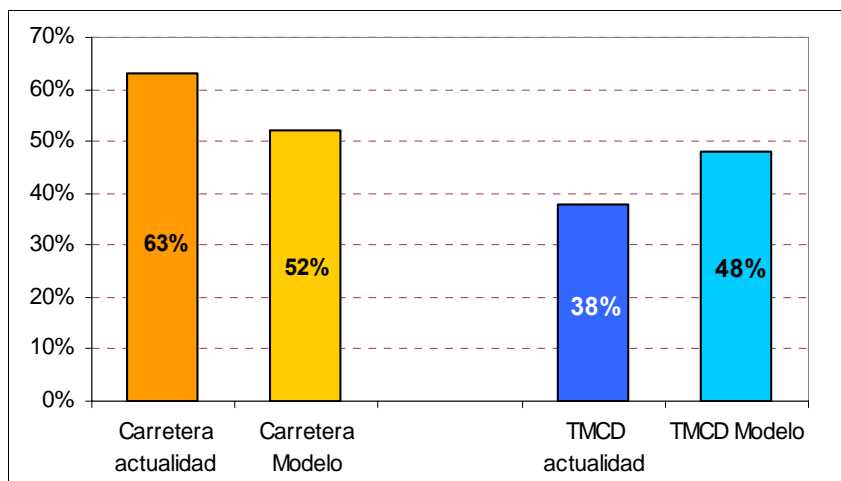


Figura 5-5. Comparación de las cuotas de mercado de la carretera y el TMCD en el modelo propuesto y en la actualidad.

El parámetro Δt de valor 10%, provoca que de las 9 rutas que en términos de ocupación y costes podrían haber utilizado el TMCD, 2 de ellas se desplacen a la carretera debido a que el tiempo de tránsito del TMCD es un 10% mayor que en la carretera, resultando finalmente que 7 rutas sean las que utilizan el TMCD. Si el valor de Δt introducido hubiera sido del 5% (haciendo la restricción todavía más estricta), la cuota de mercado del TMCD habría bajado del 48% al 41%, valor tan sólo 3 puntos por encima que la actual cuota de mercado del TMCD según el Eurostat. Esta reflexión viene a indicar que, en base al modelo planteado, cualquier disminución o ahorro en el tiempo de operativa portuaria o en el tramo marítimo vendrían a representar un aumento de la cuota de mercado del TMCD respecto a la carretera. En el siguiente capítulo se tratarán todas estas cuestiones con el fin de analizar que parámetros son los que podrían aumentar la competitividad del TMCD frente a la carretera.

5.1.5.2 Costes de la carretera en relación al TMCD

Son particularmente interesantes los resultados relativos a costes obtenidos en el modelo propuesto. Partiendo de la hipótesis que todas las plataformas pudieran ser transportadas con el modo que optimizara el coste total del transporte, éste sería de 2.051.993,7 €, que se traduce en un coste promedio de 1.030 €/plataforma transportada de Catalunya a Italia. Esta hipótesis implicaría una situación en la que únicamente 5 de las 100 rutas seleccionadas usaría el modo terrestre para realizar el transporte, con lo que resultaría que el TMCD tendría una cuota de mercado de más del 95% del total de plataformas transportadas. Se trata del coste mínimo por unidad transportada según la configuración de parámetros adoptada, sin restricción del número de buques.

Sin embargo, la restricción impuesta en el número de buques disponibles hace que, a pesar de que los costes del transporte asociados a la cadena intermodal sean inferiores, en promedio un 24%, muchas de las rutas se vean obligadas a realizar el transporte mediante el modo terrestre. Esta circunstancia hace que el coste total del transporte pase a los 2.434.911,9 €, más de un 18% de diferencia.

En consecuencia, el coste unitario promedio del transporte de una plataforma de Catalunya a Italia pasa de los 1.030 a los 1.222,3 €/plataforma, un 19% de aumento.

En la Tabla 5-11 se resumen los principales valores asociados a la comparación de costes realizada. En ella se detallan los valores unitarios del transporte de una plataforma en varios casos. Todos los valores son bajo las condiciones y parámetros determinados en los apartados anteriores.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste total del transporte	2.434.911,89 €	
Coste asociado a cada modo	1.520.429,7 € (62,4%)	914.482,2 € (37,6%)
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.471 €/plataforma	954 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,976 €/km	0,882 €/km

Tabla 5-11. Comparación de costes entre modos de transporte.

El valor obtenido en el coste unitario del transporte terrestre es ligeramente superior al definido en el apartado 3.3.3, ya que en la Tabla 5-11 se incluye el coste de inventario de las mercancías en tránsito. Por otra parte, destaca la diferencia entre los costes unitarios por kilómetro recorrido del transporte terrestre y marítimo, pues el primero es más de un 10% mayor que el segundo. Además, partiendo de la base que todo el análisis de costes se realiza desde la óptica del transportista terrestre, el hecho que el coste marítimo ya lleve incluido el correspondiente beneficio de la compañía naviera (circunstancia que no ocurre en el terrestre) induce a pensar que si este beneficio no se hubiera considerado, la diferencia podría ser todavía mayor. Probablemente, una primera conclusión que se podría obtener de todo ello es que la poca oferta existente de servicios TMCD sumada al hecho que el transporte marítimo lleva asociado un mayor volumen de documentación y gestiones por parte del transportista, hace que la cuota de mercado actual de la carretera sea mayor que la del transporte marítimo de corta distancia.

Finalmente, comentar que el transporte terrestre, con una cuota de mercado según el modelo del 52%, lleva asociado más del 62% de los costes totales del transporte de plataformas, mientras que el TMCD, con una cuota del 48%, representa solamente el 37,6% de los costes totales. Es una clara evidencia de la potencialidad del TMCD como alternativa al transporte puro por carretera.

5.1.5.3 Tiempos de la carretera en relación al TMCD

En el caso planteado también se ha estudiado el tiempo de tránsito total de las plataformas. En el mundo del transporte, a menudo, las exigencias en el cumplimiento de los horarios de entrega de los pedidos a los clientes son fundamentales para asegurar la competitividad de las empresas de transporte. Sin embargo, a diferencia de la paquetería, el transporte de mercancías debe asegurar flujos continuos de mercancía de un origen a un destino en concreto. En este sentido, es importante destacar que para que el TMCD constituya una auténtica alternativa intermodal al transporte puro por carretera, cuanto mayor sea la frecuencia de los buques en una línea en concreto, más posibilidades de éxito tendrá el TMCD.

En el caso planteado, la estructura de tiempos de las rutas estudiadas es similar entre sí. El tiempo dedicado al acarreo en origen es bastante corto ya que los orígenes seleccionados se

encuentran a distancias terrestres directas menores de 200 km del puerto de Barcelona. Por su parte, el tiempo de acarreo en destino, a excepción de la ciudad de Palermo, representa en la mayoría de los casos un tiempo inferior a las 15 horas. Recordar que en el cálculo del tiempo dedicado al acarreo se ha considerado un tiempo total de 3 horas dedicado a la carga y descarga de mercancías.

En la Tabla 5-12 se representa, para cada ruta estudiada, qué solución de transporte es la más rápida y, entre paréntesis, en qué porcentaje lo es respecto al otro modo. Lo indicado no es el resultado de la aplicación del algoritmo sino que es el modo de transporte más competitivo en términos exclusivamente de tiempo de tránsito total de las plataformas.

<i>Tiempos</i>		<i>Destinos j</i>									
		Roma	Nápoles	Palermo	Bologna	Florenia	Bari	Taranto	Perugia	Foggia	Terni
<i>Orígenes i</i>	Barcelona	TMCD 7%	TMCD 5%	TMCD 4%	CAR 27%	CAR 26%	TMCD 5%	TMCD 4%	CAR 8%	TMCD 3%	TMCD 2%
	L'Hospitalet de Llobregat	TMCD 7%	TMCD 5%	TMCD 4%	CAR 27%	CAR 26%	TMCD 4%	TMCD 4%	CAR 8%	TMCD 3%	TMCD 2%
	Badalona	TMCD 6%	TMCD 5%	TMCD 3%	CAR 28%	CAR 26%	TMCD 4%	TMCD 4%	CAR 9%	TMCD 2%	TMCD 1%
	Sabadell	TMCD 5%	CAR 3%	TMCD 2%	CAR 29%	CAR 27%	TMCD 3%	TMCD 3%	CAR 10%	TMCD 1%	CAR 1%
	Terrassa	TMCD 5%	TMCD 3%	TMCD 2%	CAR 29%	CAR 27%	TMCD 3%	TMCD 3%	CAR 10%	TMCD 1%	CAR 0,5%
	Sta. Coloma de Gramanet	TMCD 6%	TMCD 4%	TMCD 3%	CAR 28%	CAR 27%	TMCD 4%	TMCD 4%	CAR 9%	TMCD 2%	TMCD 0,1%
	Girona	CAR 7%	CAR 7%	CAR 5%	CAR 37%	CAR 36%	CAR 6%	CAR 6%	CAR 21%	CAR 9%	CAR 13%
	Lleida	TMCD 5%	TMCD 4%	TMCD 3%	CAR 26%	CAR 24%	TMCD 3%	TMCD 3%	CAR 8%	TMCD 1%	CAR 0,02%
	Tarragona	TMCD 6%	TMCD 4%	TMCD 3%	CAR 26%	CAR 25%	TMCD 4%	TMCD 4%	CAR 8%	TMCD 2%	TMCD 1%
	Reus	TMCD 6%	TMCD 5%	TMCD 3%	CAR 26%	CAR 24%	TMCD 4%	TMCD 4%	CAR 8%	TMCD 2%	TMCD 1%

Tabla 5-12. Modo de transporte más competitivo en tiempo de tránsito total.

Una aplicación práctica de estos resultados para una empresa de transporte podría ser la de determinar de forma rápida los envíos urgentes. Normalmente, todas las empresas de transporte disponen de distintas tarifas en función de la urgencia que manifieste el cliente para que la mercancía sea transportada. En este sentido, sería sencillo introducir en el algoritmo qué rutas son de carácter urgente y asignar instantáneamente el modo que sea más rápido a dichas rutas y su coste especial por el carecer de urgencia. Ciñéndonos a los resultados obtenidos, destaca que para la población de Girona el transporte puramente terrestre es, como mínimo, un 5% más rápido que el TMCD. Destaca también que para las poblaciones situadas en la parte centronorte de Italia (Bologna, Florenia y Perugia) el modo más rápido de envío es la carretera ya que su ubicación en el territorio hace que las distancias recorridas sean menores. Todo lo relativo a comparación de distancias se comentará en el apartado 5.1.5.4.

Una vez aplicado el algoritmo propuesto para la resolución del problema, muchas de las rutas que eran competitivas en tiempo en TMCD pasan a la carretera debido a la restricción de capacidad del número de buques disponible. De esta manera, de las 95 rutas que en términos de coste eran más competitivas en TMCD, únicamente 7 de ellas pueden realizarse a través de este modo por la comentada restricción de capacidad de los buques. La influencia que tiene esta restricción en términos de tiempo es el punto que se analizará a continuación.

El tiempo mínimo total que resultaría de seleccionar el modo más rápido para todas las rutas, sin tener en cuenta el algoritmo, sería de 76.386 horas. Este valor es el resultado de sumar el tiempo necesario para transportar todas las plataformas de cada origen a su destino en el modo más rápido. Ahora bien, en base al algoritmo y siguiendo los criterios citados de costes, ocupación y capacidad de los buques, el tiempo total de transporte pasa a 77.627 horas, menos de un 2% mayor. Es interesante el resultado obtenido, ya que en el caso estudiado, el óptimo en cuanto a distribución de mercancías está muy cerca del mínimo tiempo de transporte.

En la Tabla 5-13 se presenta un resumen de los resultados respecto al tiempo de tránsito de las plataformas. Los valores aquí representados corresponden a multiplicar el número de plataformas cada ruta p_{ij} por el tiempo dedicado al transporte de las mismas; viene a ser el resultado de sumar el tiempo que indicaría un cronómetro colocado en cada plataforma.

Concepto	Carretera	TMCD
Tiempo total de transporte	77.627,6 horas	
Tiempo que consume cada modo	41.465,2 h (53,4%)	36.162,4 h (46,6%)
Tiempo promedio unitario de cada modo por plataforma	40,1 h/plataforma	37,74 h/plataforma

Tabla 5-13. Comparación de tiempos entre modos de transporte.

Otro dato interesante resulta de comparar el tiempo que invertiría cada modo para el transporte de todas las plataformas de sus orígenes a sus destinos. En este caso, la carretera invertiría un total de 79.979 horas para este acometido, mientras que el TMCD dedicaría un total de 79.305 horas. Queda claro entonces que la solución intermodal, con 77.627 horas, optimiza el tiempo total de tránsito de las mercancías.

La estructura de tiempos que presentan las rutas que realizan los envíos en TMCD es la que se muestra en la Figura 5-6.

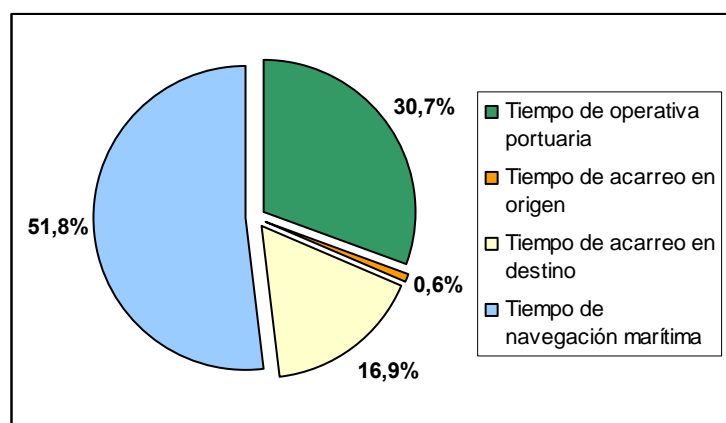


Figura 5-6. Estructura de tiempos de los casos de TMCD del modelo.

5.1.5.4 Distancias de la carretera en relación al TMCD

En este apartado se analizarán las distancias que debe cubrir cada modo en la ruta que resulta de la aplicación del algoritmo. Sin embargo, como se ha realizado en el apartado anterior, es de especial interés conocer qué ocurriría si cada modo por separado asumiese por sí mismo todo el transporte de plataformas.

En primer lugar, si el modo puramente terrestre fuera el encargado de transportar todas las plataformas, el resultado de sumar la distancia recorrida por el número de plataformas distribuidas sería de 3.017.973 km recorridos. Por su parte, si el TMCD hubiera sido el encargado de distribuir todas las plataformas, teniendo en cuenta la distancia marítima y los acarreo en origen y en destino, el valor obtenido habría sido de 2.310.558 km, aproximadamente un 25% menos de distancia que su competidor puramente terrestre. Está claro que la situación geográfica de Catalunya e Italia incide notablemente en esta diferencia, ya que si comparamos la distancia terrestre directa entre el puerto origen (Barcelona) y el de destino (Civitavecchia) que es de 1.382 km, la distancia marítima que los une es de tan sólo 830 km.

Por su parte, la distancia total que minimizaría el total de distancia recorrida es de 2.293.317 km, valor muy próximo a la distancia que correspondería a la situación en la que el TMCD se encargaría de todo el transporte de mercancías. Las rutas que minimizan la distancia recorrida corresponderían todas al TMCD a excepción de los destinos Bolonia y Florencia, cuya distancia es menor desde todos los orígenes con el modo puramente terrestre. Este resultado es una evidencia más del poco potencial del TMCD con las regiones situadas al norte de Italia, donde la carretera se impone en distancias y tiempos respecto al TMCD (pero no siempre en costes).

Centrándonos en el resultado una vez aplicado el algoritmo, se resumen en la Tabla 5-14 los resultados más importantes relativos a distancias.

Concepto	Carretera	TMCD
Distancia total de transporte	2.601.391,9 km	
Distancia recorrida por cada modo	1.564.718,1 km (60,1%)	1.036.671,8 km (39,9%)
Distancia promedio de cada modo por plataforma	1.513 km/plataforma	1.083 km/plataforma

Tabla 5-14. Comparación de distancias entre modos de transporte.

La distancia recorrida por el TMCD incluye los acarreo en origen y destino. Desglosando la distancia recorrida por el TMCD en las distintas componentes que consumen distancia, se obtiene lo mostrado en la Figura 5-7.

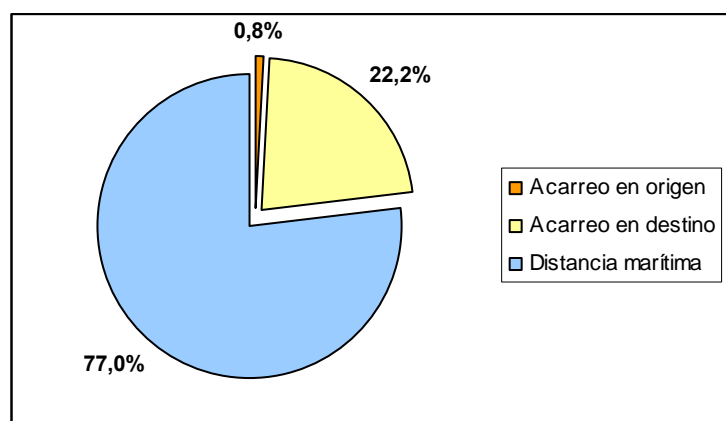


Figura 5-7. Desglose de los tramos de TMCD que consumen distancia.

Los acarreos en origen y destino suponen el 23% de la distancia terrestre recorrida mediante el modo TMCD. Con independencia de si el acarreo se realiza en origen o destino, se obtiene que una ruta de éxito en TMCD debe presentar, por lo general, acarreos que no superen el 30% de la distancia total de trayecto. Este punto se analizará más detenidamente en el siguiente apartado dedicado a determinar en qué condiciones y circunstancias el TMCD puede representar una auténtica alternativa intermodal al transporte de mercancías puramente terrestre.

5.1.5.5 Resumen de resultados

Una vez obtenida la solución del sistema, es de especial interés comparar entre sí los distintos resultados relativos a costes, tiempos y distancias obtenidas de la aplicación práctica planteada. La metodología propuesta para hallar el óptimo obtiene una solución que minimiza costes bajo unas restricciones específicas de capacidad (disponibilidad de buques en la terminal portuaria y su capacidad) y tiempo total de tránsito de la mercancía. En los apartados anteriores se han analizado los costes, tiempos y distancias de las rutas que configuran la solución final X_{ij} y, al mismo tiempo, se han comparado con los resultados que minimizarían costes, tiempos y distancias respectivamente, sin tener en cuenta las restricciones de capacidad y tiempo. En la Tabla 5-15 se detalla cada uno de estos resultados.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	2.434.912 €	1.520.430 € (62,4%)	914.482 € (37,6%)
	Tiempo de transporte	77.627,6 h	41.465,2 h (53,4%)	36.162,4 h (46,6%)
	Distancia total de transporte	2.601.392 km	1.564.718 km (60,1%)	1.036.672 km (39,9%)
	Mínimo coste del transporte	2.051.994 €	61.560 € (3%)	1.990.434 (97%)
	Mínimo tiempo de transporte	76.386 h	10.940 h (14,3%)	65.446 h (85,7%)
	Mínima distancia de transporte	2.293.318 km	268.224 km (11,7%)	2.025.033 km (88,3%)

Tabla 5-15. Comparación de resultados de la validación.

Como se puede observar en la Tabla 5-15, la alternativa intermodal de TMCD es la que proporciona en los campos de costes, tiempos y distancias, mejores resultados; sin embargo,

las restricciones impuestas en el algoritmo hacen que muchas de las rutas se desplacen al modo puramente terrestre y se configure la solución definitiva X_{ij} .

En definitiva, las cuotas de mercado obtenidas en la aplicación del caso práctico son bastante coherentes con las de la realidad. La diferencia de 10 puntos con los datos que ofrece el Eurostat se puede explicar por la alta capacidad del buque seleccionado, el *Eurostar Barcelona*, que es muy superior a la habitual de los buques que se dedican a tráficos ro-ro.

6 Valoración de la incidencia de las principales variables del modelo en la cuota de mercado del TMCD

El objetivo de este apartado consiste en analizar cuáles son los parámetros decisivos para determinar bajo qué condiciones el TMCD representa una auténtica alternativa intermodal al transporte de mercancías puramente terrestre así como cuantificar éstos en la cuota de reparto modal TMCD – terrestre puro.

6.1 Introducción y justificación del análisis

Centrándonos en el contenido y objetivos de este capítulo, en este caso se planteará inicialmente la situación de intercambio comercial entre España e Italia. Este primer análisis se justifica para evaluar la influencia de las distancias de acarreo en la aplicación del algoritmo; en el capítulo anterior, las distancias de acarreo eran de poca magnitud, por lo que es imprescindible ampliar el marco geográfico de análisis para obtener distancias de acarreo mayores.

Una vez seleccionado el ámbito geográfico de aplicación del modelo de distribución de mercancías y analizados los resultados para distintos puertos españoles, se procederá a realizar una valoración de los principales parámetros que intervienen en el algoritmo, como el coeficiente δ que representa el beneficio de la naviera (δ), la capacidad del buque (S) o el número de buques disponibles para el transporte marítimo de mercancías (W_h). Finalmente, en el apartado 6.3.3.2 se realiza una comparación de las emisiones de CO₂ de cada uno de los modos de transporte analizados en los escenarios futuros analizados.

6.2 Rutas de España a Italia

6.2.1 Elección de los orígenes y destinos

La selección de orígenes y destinos seguirá el mismo criterio establecido en el apartado 5.1 pero ampliando el marco geográfico estudiado. Al igual que en el apartado 5.1.1, para la elección de orígenes se cruzarán datos de comercio exterior a nivel provincial con datos poblacionales. En este caso se han considerado los datos macroeconómicos del 2004, teniendo en cuenta todas las categorías de productos.

En la Tabla 6-1 se resumen los datos relativos a importaciones y exportaciones de las 10 provincias españolas que más intercambios comerciales realizan:

Concepto	Porcentaje sobre España	Peso ponderado por imp. y exp.
Importaciones Barcelona	29,00%	27,79%
Exportaciones Barcelona	26,59%	

Concepto	Porcentaje sobre España	Peso ponderado por imp. y exp.
Importaciones Madrid	23,43%	16,94%
Exportaciones Madrid	10,44%	
Importaciones Valencia	5,74%	6,35%
Exportaciones Valencia	6,95%	
Importaciones Pontevedra	2,80%	3,72%
Exportaciones Pontevedra	4,64%	
Importaciones Zaragoza	2,93%	3,69%
Exportaciones Zaragoza	4,46%	
Importaciones Vizcaya	3,41%	3,43%
Exportaciones Vizcaya	3,44%	
Importaciones Tarragona	3,19%	2,93%
Exportaciones Tarragona	2,67%	
Importaciones Cádiz	2,64%	2,84%
Exportaciones Cádiz	3,05%	
Importaciones Murcia	2,93%	2,78%
Exportaciones Murcia	2,62%	
Importaciones Valladolid	2,77%	2,55%
Exportaciones Valladolid	2,34%	

Tabla 6-1. Datos de importaciones y exportaciones de Catalunya sin la categoría “combustibles minerales”. Fuente: Agencia Tributaria 2004.

A diferencia del caso de Catalunya en el que sólo se analizaban 4 provincias, la selección realizada en la Tabla 6-1 ya incorpora diez candidatos (la capital de provincia respectiva) para ser considerados origen del caso estudiado. No obstante, es de especial interés contrastar si la correlación entre volumen de comercio y tamaño poblacional se mantiene en la selección realizada. Como en este caso el ámbito de estudio es mayor, el tamaño poblacional se ha tratado agrupado en áreas metropolitanas, concepto más idóneo para reflejar la necesidad de un grupo poblacional de productos de consumo de todo tipo.

Provincia	Área metropolitana	Habitantes	Ranking respecto España	Origen <i>i</i>
Barcelona	Área metropolitana de Barcelona	3.135.758	2	1
Madrid	Área metropolitana de Madrid	5.843.041	1	2
Valencia	Área metropolitana de Valencia	1.694.970	3	3
Pontevedra	Área metropolitana de Vigo	423.821	15	4
Zaragoza	Área metropolitana de Zaragoza	683.763	9	5
Vizcaya	Área metropolitana de Bilbao	947.581	6	6
Tarragona	Área metropolitana de Tarragona	375.749	21	7
Cádiz	Área metropolitana de Cádiz-Jerez	615.494	11	8
Murcia	Área metropolitana de Murcia	563.272	12	9
Valladolid	Área metropolitana de Valladolid	383.894	20	10

Tabla 6-2. Datos poblacionales de los orígenes españoles. Fuente: Proyecto AUDES, basado en datos de poblacionales del INE (2005).

Todos los orígenes seleccionados corresponden a alguna de las principales áreas metropolitanas españolas. Sin embargo, a diferencia del caso Catalunya – Italia, la correspondencia es menor entre datos de comercio y datos poblacionales. No obstante, la selección se considera suficiente para representar los intercambios entre España e Italia.

En lo relativo a selección de destinos, se seleccionan las 10 principales poblaciones de Italia según su tamaño poblacional, tal y como se indica en la Tabla 6-3.

Región	Poblaciones	Habitantes	Ranking respecto Italia	Destino j
Lazio	Roma	2.847.677	1	1
Lombardía	Milán	1.308.735	2	2
Campania	Nápoles	984.242	3	3
Piamonte	Turín	900.608	4	4
Sicilia	Palermo	670.820	5	5
Liguria	Génova	620.316	6	6
Emilia-Romagna	Bologna	373.743	7	7
Toscana	Florenia	366.901	8	8
Apulia	Bari	326.915	9	9
Sicilia	Catania	304.144	10	10

Tabla 6-3. Conjunto de destinos seleccionados. Fuente: ISTAT, 2006.

Una vez seleccionados los orígenes y los destinos del caso, se trata ahora de determinar el flujo de mercancías, expresado en número de plataformas, de España a Italia.

6.2.2 Determinación del flujo de mercancías. Matriz P_{ij}

Al igual que en el capítulo anterior, la determinación del flujo de mercancías P_{ij} se realizará mediante una metodología que cruza datos de distintas fuentes para representar la realidad de los envíos de España a Italia. Cabe destacar que España es un país claramente importador y, la tendencia en los últimos años apunta hacia un desequilibrio mayor entre exportaciones e importaciones.

Para obtener resultados coherentes con la realidad, se tomará el arco euro-mediterráneo como marco principal de análisis. Los intercambios de mercancías entre España y los países del arco euro-mediterráneo superaron durante el 2005 los 31 millones de toneladas, de los cuales el 56% corresponde a importaciones y el 44% restante a exportaciones, según el *Eurostat* (2005).

Francia e Italia son los dos países del arco euro-mediterráneo que representan los principales intercambios de mercancías con España. El comercio con Francia representa el 52,4% de la cuota de mercado, frente al 40,6% de Italia. Por su parte, Grecia y Austria se reparten el 7% restante.

Centrando el ámbito de estudio en Italia, durante el 2005 se exportaron un total de 5.709.326 de toneladas. El modo de transporte utilizado para estos intercambios se detalla en la Figura 6-1.

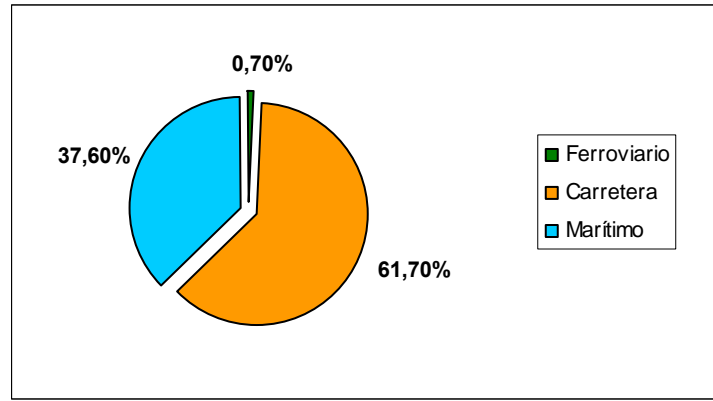


Figura 6-1. Distribución por modos de transporte de las exportaciones de España a Italia. Fuente: Eurostat, 2005.

El citado volumen de 5.709.326 toneladas se puede transformar en un número aproximado de 420.000 plataformas o semirremolques año con origen en España y destino a Italia. Esta conversión se realiza bajo la hipótesis que la unidad de carga que se considera para el transporte de plataformas es el semirremolque, cuya capacidad permite transportar, en promedio, 13,5 toneladas de mercancías.

Del total de plataformas, es necesario separar aquellas mercancías que no son susceptibles de ser transportadas mediante este tipo de unidad de carga (p.ej. graneles líquidos). En este sentido, consultando el tipo de mercancías transportadas según las estadísticas de tráfico de Puertos del Estado del 2004, la mercancía general y parte de los graneles sólidos (25%) representa aproximadamente el 52% del total de mercancías movidas por los puertos. De esta manera, de las 420.000 plataformas que se mueven de España a Italia anualmente, 220.000 de ellas son las que definitivamente son susceptibles de ser captadas por el TMCD o la carretera indistintamente.

Una vez obtenido el número de plataformas, se está en condiciones de asignar los valores a la matriz de demanda origen – destino P_{ij} . Al igual que en el primer caso, el reparto se hará por el peso poblacional de los orígenes i y los destinos j según la expresión (6-1).

$$p_{ij} = \Omega_{ij} \cdot P \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{matrix} \quad (6-1)$$

donde,

p_{ij} = plataformas con origen i y destino j
 Ω_{ij} = peso de reparto poblacional de mercancías
 P = número de plataformas totales

El coeficiente Ω_{ij} de la expresión (6-1) se calcula como el peso de la población i respecto a la suma del total de la población de los orígenes multiplicado por el peso del destino j respecto a la suma del total de habitantes de los destinos como se indicaba en el capítulo anterior..

El resultado de aplicar esta metodología configura la matriz P_{ij} donde se representa el número de plataformas p_{ij} diarias con origen en España y destino Italia.

P_{ij} (plataformas/día)		Destinos j									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Orígenes i	1	59,34	20,51	13,98	7,79	7,65	6,81	4,04	3,29	3,22	2,28
	2	110,58	38,22	26,05	14,51	14,25	12,69	7,53	6,12	6,01	4,26
	3	32,08	11,09	7,56	4,21	4,13	3,68	2,19	1,78	1,74	1,23
	4	8,02	2,77	1,89	1,05	1,03	0,92	0,55	0,44	0,44	0,31
	5	12,94	4,47	3,05	1,70	1,67	1,49	0,88	0,72	0,70	0,50
	6	17,93	6,20	4,22	2,35	2,31	2,06	1,22	0,99	0,97	0,69
	7	7,11	2,46	1,68	0,93	0,92	0,82	0,48	0,39	0,39	0,27
	8	11,65	4,03	2,74	1,53	1,50	1,34	0,79	0,65	0,63	0,45
	9	10,66	3,68	2,51	1,40	1,37	1,22	0,73	0,59	0,58	0,41
	10	7,26	2,51	1,71	0,95	0,94	0,83	0,49	0,40	0,39	0,28

Tabla 6-4. Matriz de distribución de mercancías diarias P_{ij} .

6.2.3 Inputs del sistema España e Italia

Dado que el objetivo de esta apartado consiste en analizar qué parámetros influyen de forma más decisiva dada una configuración de demanda de transporte (matriz P_{ij}) y un ámbito de aplicación (orígenes y destinos seleccionados en España e Italia respectivamente), en este caso se seleccionarán los mismos parámetros de coste de inventario (coeficiente α), beneficio de la naviera (δ) y diferencia de tiempo entre cadenas de transporte (Δt) que en la validación del modelo.

También es necesario definir un enlace marítimo entre orígenes y destinos. En este punto, se utilizarán tres posibilidades distintas en origen y cuatro en destino, con el propósito de obtener distintas configuraciones reales de los principales servicios TMCD que operan en aguas del mediterráneo. El objetivo es analizar como influye la relación entre acarreo y distancia marítima respecto la solución óptima que encuentra el sistema. En este sentido, los puertos españoles seleccionados para el análisis son los de Barcelona, Tarragona y Valencia. Estos puertos son los que, a día de hoy, ofrecen servicios regulares de TMCD en el arco euro-mediterráneo. En Italia, los puertos seleccionados son los de Génova y Livorno (Norte de Italia), Civitavecchia (Centro de Italia) y el de Salerno (Sur de Italia). En lo relativo a número y capacidad de buques, se utilizará el buque que opere con más frecuencia en cada una de las rutas seleccionadas.

La matriz de distancia terrestre directa D_{ij} (ver Tabla 6-5) se mantendrá en todos los casos mientras que las matrices de acarreo terrestre (D_{ih} y D_{hj}) y distancia marítima (D_m) se adaptarán a cada caso analizado.

D_{ij} (km)		Destinos j									
		Roma	Milán	Nápoles	Turín	Palermo	Génova	Bologna	Florenia	Bari	Catania
Orígenes i	Barcelona	1362,6	978,9	1556,4	869,3	2259,3	857,6	1139,2	1098,1	1787,3	2133,6
	Madrid	1971,8	1588,2	2165,6	1481,6	2871,4	1469,7	1748,4	1707,3	2396,5	2745,1
	Valencia	1704,5	1320,8	1898,3	1220,2	2606,9	1207,6	1481,0	1439,9	2129,2	2480,7
	Pontevedra	2421,4	2037,7	2615,2	1898,5	3318,0	1916,3	2197,9	2156,8	2846,1	3191,8
	Zaragoza	1649,2	1265,5	1843,0	1156,2	2545,8	1144,2	1425,7	1384,6	2073,9	2419,7
	Bilbao	1699,0	1315,4	1892,8	1206,9	2596,0	1194,1	1475,6	1434,5	2123,7	2469,6
	Tarragona	1452,8	1069,1	1646,6	960,0	2349,2	947,9	1229,3	1188,2	1877,5	2215,6
	Cádiz	2532,9	2149,2	2726,7	2039,6	3430,0	2027,6	2309,5	2268,4	2957,6	3303,1
	Murcia	1971,9	1588,2	2165,7	1478,8	2869,0	1466,9	1748,4	1707,3	2396,6	2742,5
	Valladolid	1967,1	1583,5	2161,0	1474,0	2864,0	1462,0	1743,7	1702,6	2391,8	2737,5

Tabla 6-5. Matriz de distancias terrestres directas D_{ij} del caso nº 2. Fuente: www.mappy.com

En los siguientes apartados se procederá a resolver cada caso planteado y analizar qué variables influyen en la solución óptima que proporciona el algoritmo diseñado. En primer lugar, el apartado 6.2.4 se dedicará exclusivamente a comentar los resultados obtenidos para las parejas puerto origen – puerto destino seleccionadas, mientras que en el último capítulo se realizará un análisis de la incidencia de las variables en la cuota de mercado del TMCD.

Aunque el algoritmo diseñado permite únicamente la selección de una ruta marítima cada vez que compila una solución, éste es válido para determinar la potencialidad y competitividad de un puerto en la oferta de servicios de TMCD.

6.2.4 Análisis de resultados de las relaciones España e Italia

En la Tabla 6-6 se muestran las distintas configuraciones adoptadas, así como los principales inputs asociados a las mismas.

Puerto origen	Puerto destino	Número Buques W_h por semana	Capacidad de los buques S
Barcelona	Civitavecchia	6	30.860 GT
Barcelona	Génova	5	35.186 GT
Valencia	Livorno	2	25.984 GT
Valencia	Salerno	3	16.925 GT
Tarragona	Livorno	3	15.224 GT
Tarragona	Salerno	1	8.126 GT

Tabla 6-6. Enlaces marítimos seleccionados.

A continuación se detallan de forma resumida los resultados obtenidos en forma de tablas para luego, realizar la valoración final de los parámetros que determinan la potencialidad del TMCD.

6.2.4.1 Resultados para el puerto de Barcelona

En primer lugar se ha analizado el conjunto de rutas tipo España – Barcelona – Civitavecchia – Italia. En la Tabla 6-7 se resumen los resultados obtenidos. En los resultados también se ofrecen los resultados para costes, tiempos y distancias sin tener en cuenta las restricciones del problema.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_j	Costes del transporte	5.569.163 €	4.375.812 € (78,6%)	1.193.351 € (21,4%)
	Cuota de mercado	3.618 plat.	2.535 plat. (70%)	1.083 plat. (30%)
	Tiempo de transporte	167.024 h	118.705 (71,1%)	48.319 h (28,9%)
	Distancia total de transporte	5.931.605 km	4.479.545 km (75,5%)	1.452.060 km (24,5%)
	Acarreos en origen y destino		-	549.101 km (37,8%)
	Distancia marítima			903.180 km (62,2%)
Mínimo coste del transporte		4.769.522 €	1.350.140 € (28,3%)	3.419.382 € (72,7%)
Mínimo tiempo de transporte		164.902 h	60.223 h (36,6%)	104.619 h (63,4%)
Mínima distancia de transporte		5.424.868 km	1.671.062 km (30,8%)	3.753.806 km (69,2%)

Tabla 6-7. Resultados para la ruta BCN-CIV.

Del total de rutas, Barcelona, Madrid y Murcia realizarían todos sus envíos a Roma mediante TMCD. Por cuestiones de la limitada oferta de servicio, para muchas de las rutas el servicio tiene que realizarse mediante carretera, pero destaca que en la mayoría de los casos, el TMCD es una alternativa muy competente en costes, tiempos y distancias recorridas. Sin duda, un aumento de la oferta de servicios TMCD en esta línea haría que, en términos de cuota de mercado del TMCD frente a la carretera, ésta alcanzara hasta un 70% del total de plataformas con destino a Italia.

Otro dato interesante resulta del coste promedio que se obtiene si el transporte se realiza de un modo u otro como se detalla en la Tabla 6-8. Los resultados indican que la ruta marítima Barcelona – Civitavecchia es un inmejorable enlace marítimo para el transporte de mercancías entre España e Italia. La ocupación final del buque resulta del 87%, por lo que el coste promedio en TMCD es muy competitivo respecto la carretera a efectos del cargador.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.726 €/plataforma	1.101 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,976 €/km	0,822 €/km

Tabla 6-8. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta BCN-CIV.

Es importante recordar que el coste promedio unitario por kilómetro recorrido se obtiene a partir de las rutas en las que el TMCD obtiene cuota de mercado, por lo que se trata de un coste promedio entre aquellas rutas en las que el TMCD es más competitivo.

A continuación, se muestran los resultados para la relación tipo España – Barcelona – Génova – Italia en la Tabla 6-9.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	6.181.196 €	4.849.885 € (78,5%)	1.345.700 € (21,5%)
	Cuota de mercado	3.618 plat.	2.891 plat. (79,9%)	727 plat. (20,1%)
	Tiempo de transporte	174.403 h	121.916 h (69,9%)	52.487 (30,1%)
	Distancia total de transporte	6.280.533 km	4.964.702 km (79,0%)	1.315.831 km (21,0%)
	Acarreos en origen y destino		-	827.699km (62,9%)
	Distancia marítima			488.132 km (37,1%)
Mínimo coste del transporte		6.019.436 €	1.187.022 € (19,7%)	4.832.414 € (80,3%)
Mínimo tiempo de transporte		169.578 h	169.578 h (100%)	0 h (0%)
Mínima distancia de transporte		5.904.251 km	564.642 km (9,6%)	5.339.609 km (90,4%)

Tabla 6-9. Resultados para la ruta BCN-GEN.

Como se desprende de la Tabla 6-9, el hecho que la distancia marítima sea pequeña y que el tiempo de transporte (sin tener en cuenta las restricciones del algoritmo) sea siempre más rápido por carretera que en el modo intermodal parece indicar que la ruta Barcelona – Génova no es idónea para el transporte de mercancías vía TMCD. Únicamente resultan rentables los envíos con origen en Barcelona y en Murcia, este último incluido por la restricción de capacidad de los buques y la imposibilidad del algoritmo de hacer grupaje de mercancías entre distintos envíos por orígenes. Aunque la distancia de transporte se minimice mediante el TMCD, la suma de tiempos de acarreo, operativa portuaria y tramo marítimo hacen que esta alternativa sea siempre más lenta que la carretera pura. Además, los acarreos que se realizan en TMCD representan más del 60% del total de distancia recorrida por el TMCD, lo que supone una clara desventaja.

En cuanto a costes, el coste unitario promedio de envío de una plataforma de España a Italia vía el enlace Barcelona – Génova es mayor que el de la carretera. Esta circunstancia hace que esta ruta pueda ser considerada poco viable para el desarrollo futuro del TMCD. Más adelante se analizarán qué factores podrían hacerla viable. Los costes del TMCD se disparan debido a que la carretera capta muchas plataformas por la restricción de tiempo impuesta y la capacidad del buque baja al 75% de ocupación.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.677 €/plataforma	1.849 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,977 €/km	0,982 €/km

Tabla 6-10. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta BCN-GEN.

6.2.4.2 Resultados para el puerto de Valencia

Se recogen a continuación los resultados obtenidos para el puerto de Valencia. En primer lugar, se analiza la relación España – Valencia – Livorno – Italia. Cabe destacar que este servicio TMCD, junto con el Tarragona – Salerno, es el que ofrece menos frecuencia de los analizados, por lo que la cuota de mercado del TMCD es de esperar que sea baja.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	6.192.065 €	5.736.449 € (92,6%)	319.435 € (7,4%)
	Cuota de mercado	3.618	3.283 (90,7%)	335 (9,3%)
	Tiempo de transporte	173.594 h	155.616 h (89,6%)	17.978 h (10,4%)
	Distancia total de transporte	6.335.749 km	6.001.142 km (94,7%)	334.607 km (95,3%)
	Acarreos en origen y destino			230.414 km (41,1%)
	Distancia marítima			330.684 km (58,9%)
Mínimo coste del transporte		5.227.809 €	1.515.602 € (29,0%)	3.712.206 € (71,0%)
Mínimo tiempo de transporte		169.579 h	169.579 h (100%)	0 h (0%)
Mínima distancia de transporte		5.989.541 km	2.590.638 km (43,3%)	3.398.904 km (56,7%)

Tabla 6-11. Resultados para la ruta VAL-LIV.

Los resultados para las rutas entre España e Italia cuyo enlace marítimo se realiza a través de los puertos de Valencia y Livorno (norte de Italia) ponen de manifiesto que las rutas con destino el Norte de Italia no son competitivas en términos de tiempo ya que el tiempo mínimo de transporte se consigue una vez más por carretera. Por este motivo el parámetro Δt se ha tenido que aumentar hasta el 30%. Las rutas que llenan los buques tienen su origen principalmente en Barcelona y Zaragoza y destino Milán y Turín. Las rutas con destino el Norte de Italia y origen en la parte centro-sur de España serían un grupo potencialmente captable por esta ruta si aumentara la oferta de servicios TMCD.

Los costes promedios de cada transporte por distancia recorrida y por unidad transportada reflejan la competitividad de este enlace marítimo.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.747 €/plataforma	1.361 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,977 €/km	0,812 €/km

Tabla 6-12. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta VAL-LIV.

El segundo enlace marítimo analizado con este puerto es el servicio TMCD entre Valencia – Salerno (sur de Italia) cuyos resultados se muestran en la Tabla 6-13.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	5.895.523 €	5.353.303 € (90,8%)	549.275 € (9,3%)
	Cuota de mercado	3.618	3.181 (87,9%)	437 (12,1%)
	Tiempo de transporte	170.756 h	144.306 h (84,5%)	26.450 h (15,5%)
	Distancia total de transporte	6.272.399 km	5.479.852 km (87,4%)	792.547 km (12,6%)
	Acarreos en origen y destino			207.702 (26,2%)
	Distancia marítima			584.846 (73,8%)
Mínimo coste del transporte		5.062.805 €	2.157.154 € (42,6%)	2.905.651 € (76,4%)
Mínimo tiempo de transporte		168.172 h	140.454 h (83,5%)	27.717 h (16,5%)

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
	Mínima distancia de transporte	6.129.932 km	3.152.480 km (51,4%)	2.977.452 km (48,6%)

Tabla 6-13. Resultados para la ruta VAL-SAL.

En este caso, las rutas que se realizan en TMCD son las que su origen está en Barcelona y Valencia y destino las poblaciones más sureñas de Italia como Nápoles, Palermo y Catania. A pesar de que los tiempos de tránsito de TMCD obtenidos son en la mayoría de los casos más lentos que la carretera (debido sobretudo a la longitud del tramo marítimo), las rutas con destino el sur de Italia consiguen tiempos y costes mejores que su competidor puramente terrestre.

En cuanto a costes promedios de transporte, la alternativa de TMCD es más rentable que la carretera pura como se detalla en la Tabla 6-14.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.683 €/plataforma	1.256 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,977 €/km	0,693 €/km

Tabla 6-14. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta VAL-SAL.

6.2.4.3 Resultados para el puerto de Tarragona

Resulta interesante el análisis de este Puerto ya que los destinos que ofrece son distintos que los de Barcelona y se complementan con los primeros. Primeramente se analiza el caso de las rutas tipo España – Tarragona – Livorno – Italia. Para este caso ha sido necesario relajar la restricción de diferencia de tiempo entre cadenas de transporte Δt y aumentar este parámetro hasta el 45% de diferencia debido a la velocidad del buque que opera en esta línea. Los resultados se detallan en la Tabla 6-15.

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	6.180.438 €	5.708.368 € (92,4%)	472.070 € (7,6%)
	Cuota de mercado	3.618	3.221 (89,0%)	397 (11,0%)
	Tiempo de transporte	175.301 h	154.854 h (88,3%)	20.447 h (11,7%)
	Distancia total de transporte	6.441.785 km	5.843.519 km (90,7%)	598.266 km (9,3%)
	Acarreos en origen y destino			205.845 km (34,4%)
	Distancia marítima			392.421 km (65,6%)
	Mínimo coste del transporte	5.529.757 €	567.625 € (10,3%)	4.962.131 € (89,7%)
	Mínimo tiempo de transporte	169.579 h	169.579 h (100%)	0 h (0%)
	Mínima distancia de transporte	6.325.875 km	2.828.175 km (44,7%)	3.497.700 km (55,3%)

Tabla 6-15. Resultados para la ruta TAR-LIV.

Una vez más, la alternativa de TMCD es en todas las rutas, más lenta que su competidor terrestre. Por el contrario, el coste mínimo se obtiene en la mayoría de las rutas si el transporte

se realiza mediante TMCD, principalmente las que tienen su destino en la parte centro-sur de Italia. Por su parte, los envíos al Norte de Italia son más competitivos en tiempo y costes mediante la carretera pura.

En términos de costes unitarios del transporte, como se ha indicado en el anterior párrafo, la alternativa intermodal de TMCD resulta muy competitiva en términos de coste.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.772 €/plataforma	1.188 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,977 €/km	0,789 €/km

Tabla 6-16. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta TAR-LIV.

Finalmente, se analiza el caso del enlace marítimo entre los puertos de Tarragona y Salerno. Los resultados se detallan en la Tabla 6-17. Destaca que el servicio ofrecido en esta línea tiene una frecuencia de un buque por semana y, además, es el que tiene menos capacidad de los analizados. Por este motivo, la restricción de capacidad hará que las rutas con aquellos orígenes que tengan más demanda de transporte no puedan realizar el transporte mediante TMCD y pasen a la carretera por la citada restricción

Situación	Concepto	TOTAL	Carretera	TMCD
Solución X_{ij}	Costes del transporte	6.210.808 €	6.009.432 € (92,4%)	201.376 € (7,6%)
	Cuota de mercado	3.618	3.486 (96,3%)	132 (3,7%)
	Tiempo de transporte	171.491 h	163.021 h (95,1%)	8.470 h (4,9%)
	Distancia total de transporte	6.413.099 km	6.151.583 km (95,9%)	261.516 km (4,1%)
	Acarreos en origen y destino			109.500 km (41,9%)
	Distancia marítima			152.016 km (58,1%)
	Mínimo coste del transporte	5.045.013 €	1.632.406 € (32,4%)	3.412.607 € (67,6%)
	Mínimo tiempo de transporte	169.153 h	150.804 h (89,2%)	18.350 h (10,8%)
	Mínima distancia de transporte	6.084.319 km	3.977.546 km (65,4%)	2.106.774 km (34,6%)

Tabla 6-17. Resultados para la ruta TAR-SAL.

Las rutas con destino al sur de Italia son las mayores beneficiadas de este servicio de TMCD. Sin embargo, el TMCD no puede competir, a excepción de las rutas con destino Sicilia y Nápoles, en términos de tiempo con la carretera. A nivel de costes, a pesar de la poca capacidad del buque que opera en esta línea y el pobre aprovechamiento de las economías de escala que aparecen cuando aumenta la capacidad del buque, el TMCD sigue siendo una alternativa rentable para el transportista.

En términos de costes unitarios, el TMCD es más rentable que la carretera pura, aunque las diferencias en términos de coste por plataforma transportada se estrechan respecto al caso analizado anteriormente.

Concepto	Carretera	TMCD
Coste promedio unitario de cada modo por plataforma	1.724 €/plataforma	1.521 €/plataforma
Coste promedio unitario de cada modo por km recorrido	0,977 €/km	0,770 €/km

Tabla 6-18. Comparación de costes entre modos de transporte para la ruta TAR-SAL.

6.3 Análisis de sensibilidad del modelo

Una vez estudiados distintos enlaces marítimos entre España e Italia, en el presente epígrafe se estudiarán aquellos parámetros y variables que definen la potencialidad del TMCD frente al modo de transporte puramente terrestre. En el presente apartado se persigue el objetivo de caracterizar aquellas rutas que pueden ser consideradas de “éxito” del TMCD frente la carretera.

Más concretamente, el análisis pretende ofrecer una serie de recomendaciones orientadas a que, antes de realizar una valoración estricta de los costes de una cadena de transporte, una serie de indicadores permitan establecer si una ruta TMCD puede ser competitiva en costes, tiempo y distancia respecto la carretera. Se trata, en definitiva, de evaluar la potencialidad del TMCD frente al transporte puramente terrestre.

A continuación se analizará la influencia que tienen en el coste y en el tiempo de recorrido distintas configuraciones de la ruta marítima, tamaño y número de buques disponibles, variaciones en las distancias de acarreo, entre otras. Los resultados que se obtengan se compararán con los obtenidos en los apartados anteriores con el objetivo de explicar más detalladamente las singularidades propias de cada solución.

6.3.1 El acarreo y los costes en el TMCD

En primer lugar, resulta interesante evaluar qué influencia tiene el porcentaje de acarreo en el coste de la cadena de TMCD respecto al de la carretera. La relación de orígenes y destinos para realizar el análisis es la misma que en el caso España e Italia, por lo que queda prácticamente representada la totalidad de intercambios comerciales entre ambos países.

Por otra parte, los puertos seleccionados como origen y destino son los de Barcelona y Civitavecchia. Para realizar el análisis ha sido preciso variar la distancia marítima del enlace seleccionado; esta circunstancia no afecta de modo alguno a la generalidad de los resultados que se buscan ya que la elección del puerto origen y destino responde estrictamente al hecho que se busca minimizar la distancia de acarreo y, según los resultados del análisis de los intercambios entre España e Italia, el enlace Barcelona – Civitavecchia minimiza la distancia total a recorrer gracias, en gran parte, a la localización estratégica del puerto italiano en la parte más meridional de este país. Los resultados del coste del TMCD en función de la distancia marítima se representan en la Figura 6-2.

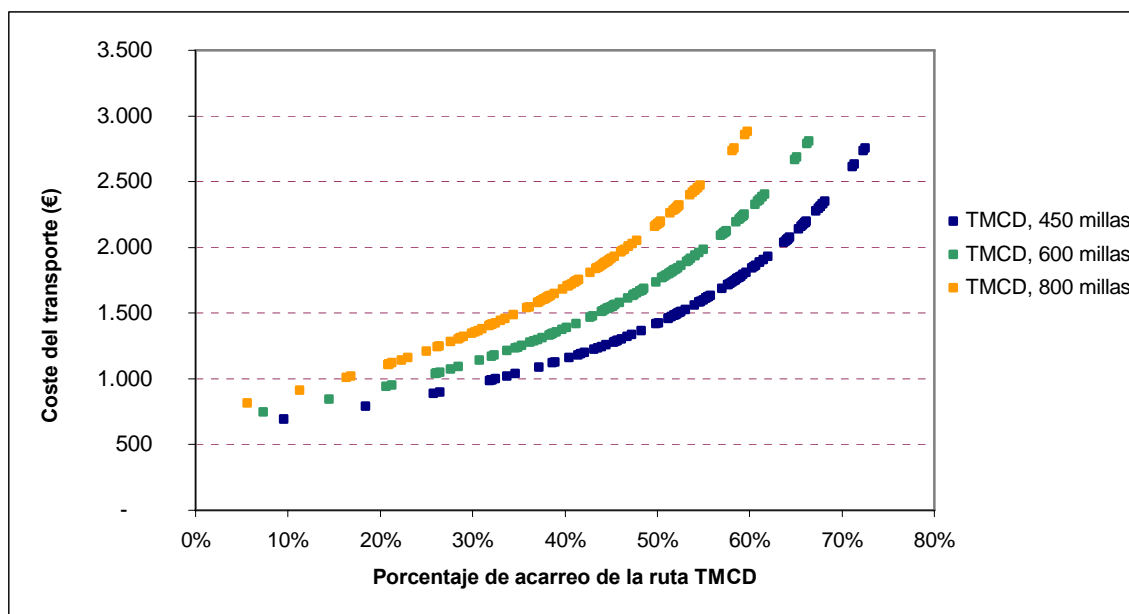


Figura 6-2. Relación entre el porcentaje de acarreo de la cadena de TMCD con el coste del transporte.

Como se puede observar en la Figura 6-2, para un mismo porcentaje de acarreo el coste del transporte mediante TMCD aumenta a medida que aumenta la distancia marítima recorrida, tal y como era de esperar. Sin embargo, resulta más interesante conocer el porcentaje de rutas en las que el coste del TMCD es menor respecto la carretera, para distintas distancias marítimas (ver Figura 6-3).

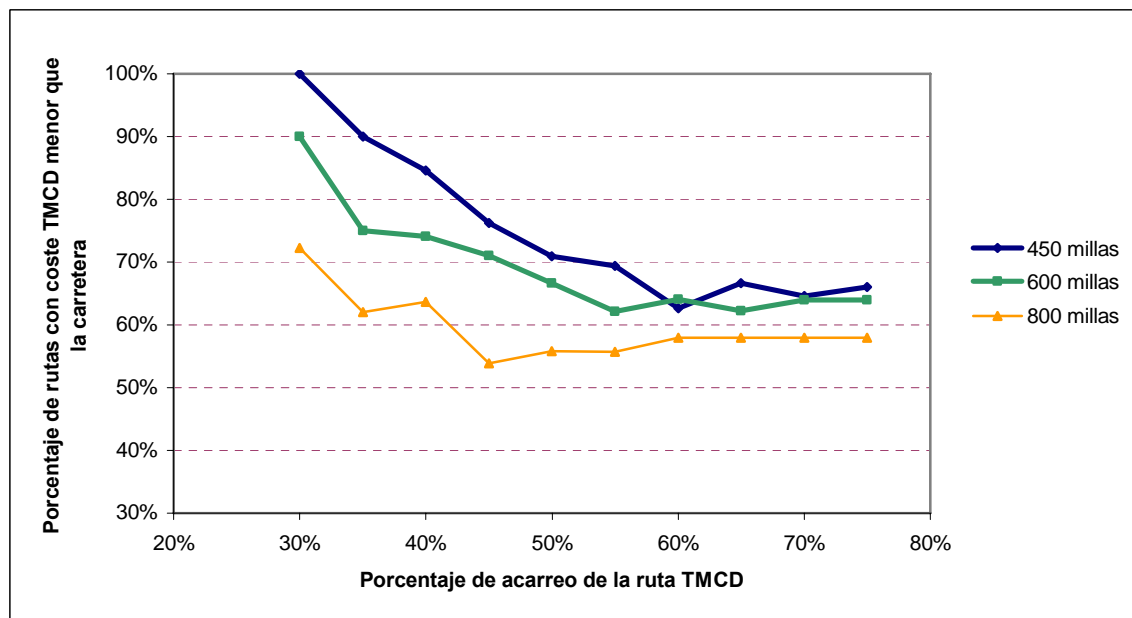


Figura 6-3 Variación del porcentaje de rutas en las que el coste de l TMCD es menor que la carretera en función de la distancia marítima.

La Figura 6-3 se ha obtenido bajo unas condiciones fijas de capacidad de buque (30.860 GT). Los resultados indican que para aquellas rutas con un porcentaje de acarreo inferior al 40%, al menos un 60% de las rutas con origen en España y destino Italia el coste del TMCD será inferior al de la carretera.

Por otro lado, destaca que a partir de acarreo que representan más del 60% de la distancia total recorrida mediante TMCD, el porcentaje de rutas en las que el coste del TMCD es menor que el de la carretera prácticamente no varía. Este porcentaje vendría a representar el límite a partir del cual las ventajas en términos de costes del TMCD empiezan a disminuir. Es decir, cuando un transportista terrestre se planteara el uso del TMCD para realizar un pedido, si la distancia de acarreo en la ruta intermodal fuera superior al 60%, quizás debería valorar la opción terrestre. Esta afirmación no quiere decir que para porcentajes de acarreo superiores al 60% la alternativa intermodal resulte más costosa que la terrestre, sino que la economicidad de la opción de TMCD disminuye frente a la opción puramente terrestre.

En la Figura 6-4 se analiza la influencia de la capacidad del buque en el porcentaje de rutas con costes del TMCD menores que los de carretera y para distintas distancias marítimas. En el apartado 3.6.2 del presente estudio, se representó la influencia de la capacidad del buque en los costes marítimos. En este sentido, se ha querido estudiar la influencia del tipo de buque en el porcentaje de rutas cuyo coste es competitivo frente a la carretera.

En la Tabla 6-19 se reflejan los datos de partida de los buques seleccionados.

Arqueo bruto	Plataformas	Definición
30.860 GT	181	S_a , capacidad alta
15.000 GT	131	S_m , capacidad media
8.500 GT	103	S_b , capacidad baja

Tabla 6-19. Capacidad de los buques para el análisis.

Los tres tipos de buques seleccionados para el análisis corresponden, de mayor a menor capacidad, al *Eurostar Roma* (buque de alta capacidad que opera en la línea Barcelona – Civitavecchia), buque genérico de capacidad media y, el de menor capacidad, que representa el buque que optimiza los costes marítimos según el análisis del apartado 3.6.2.

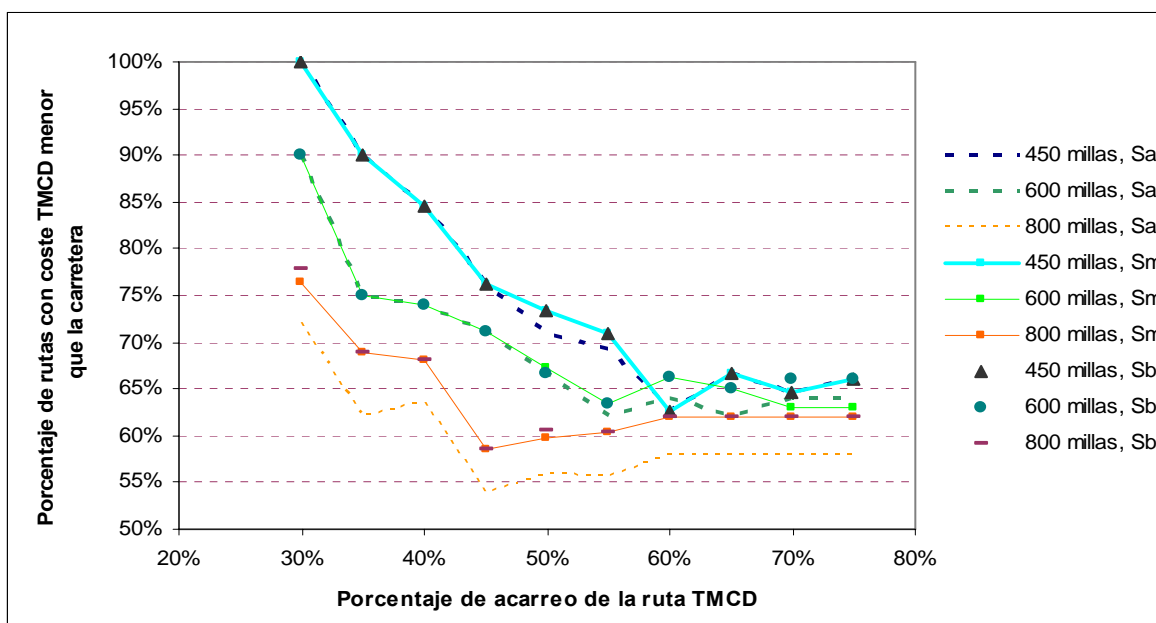


Figura 6-4. Variación del porcentaje de rutas en las que el coste del TMCD es menor que la carretera en función de la distancia marítima y la capacidad del buque S .

Los resultados de la Figura 6-4 demuestran que la variación de la capacidad del buque (S) influye de forma más significativa cuando la distancia marítima a recorrer es superior a las 600 millas. Los resultados para buques de capacidad media y baja son muy parecidos en todos los casos. Destaca, por ejemplo, que para un buque de capacidad alta y una ruta en la que la distancia marítima es de 800 millas, el porcentaje de rutas en las que el coste del TMCD es inferior al de la carretera disminuye un 10% respecto si la ruta la realizan buques de capacidad media y/o baja.

Los resultados obtenidos indican que si el acarreo supera el 60% de la distancia total de la distancia en TMCD, la competitividad en términos de coste disminuye. Por este motivo, de forma general, se podría decir que el límite de acarreo de una cadena de TMCD competitiva se sitúa alrededor del 60% de la distancia total recorrida.

El análisis realizado en este apartado responde exclusivamente a la comparación de costes de ambas alternativas, por lo que es necesario analizar el tiempo invertido en cada modo ya que, en la mayoría de los casos, se trata de un parámetro decisivo para la cuota de mercado de un modo de transporte de mercancías.

6.3.2 El tiempo en la cadena de TMCD

Como ya se ha indicado a lo largo de este estudio, el tiempo de tránsito de un modo de transporte es crucial para determinar la competitividad del mismo frente al resto. Así, los distintos modos de transporte de mercancías (aéreo, ferroviario, carretera y marítimo, principalmente) presentan distintas características en cuanto al tipo de mercancías que transportan y al coste del transporte en sí mismo.

Los modos aéreo y marítimo cubren distancias de transporte muy grandes pero aquello que los distingue es el coste de inventario de las mercancías; el transporte aéreo cubre distancias elevadas en poco tiempo ya que la mercancía que transporta posee, en la mayoría de los casos, un alto valor añadido como el grupo de productos perecederos. Por su parte, el transporte marítimo transporta mercancía contenerizada, graneles sólidos y líquidos, etc., que por volumen y coste de inventario, hacen del transporte marítimo la única solución rentable y segura de transporte. Por otro lado, los modos ferroviario y terrestre, que se complementan en muchas ocasiones con todos los demás, son idóneos para el transporte de mercancías en los casos en los que la distancia a cubrir es inferior que en los anteriores. Las peculiaridades de la red ferroviaria española hacen que, a pesar de futuros proyectos aún no terminados, este modo de transporte de mercancías resulte poco atractivo respecto al resto.

Ante esta situación, una de las posibilidades de éxito del TMCD es aquella en la que, aunque el tiempo de tránsito sea generalmente superior al de la carretera, los costes sean competitivos y posibiliten ahorros importantes. El principal usuario del TMCD podrá aumentar la frecuencia con la que utiliza el TMCD a medida que aumente la oferta de servicios y la labor de promoción del TMCD tenga el efecto deseado. Por su parte, aquellas mercancías que se puedan unificar en un semirremolque o vehículos nuevos son principalmente el tipo de carga objetivo del TMCD.

En este apartado se analizará el tiempo de tránsito del TMCD y se comparará con el de la carretera pura y se apuntarán aquellas circunstancias que pueden aumentar la competitividad

de la alternativa intermodal. Cabe mencionar que en el capítulo dedicado a la modelización de la estructura de tiempos del TMCD, la velocidad del buque resultó ser proporcional a la capacidad del mismo. Por este motivo, se analiza el tiempo de TMCD para distintas capacidades de los buques. Recordar también, que la existencia de la componente de operativa portuaria (que en general suponen unas 10 horas en el total del tiempo de tránsito) resta competitividad en cuanto a tiempo se refiere a la alternativa intermodal.

6.3.2.1 El tiempo y el acarreo en el TMCD

Como se ha venido comentando en el presente estudio, la competitividad en términos de tiempo de un modo de transporte es un factor clave para asegurar su éxito frente a los demás. En este sentido, averiguar a partir de qué circunstancias o condiciones el TMCD puede ser competitivo en tiempo total de recorrido es de interés para determinar los umbrales de distancias de acarreo máximas que pueden cubrirse.

En la Figura 6-5 y en la Figura 6-6 se analiza la situación en la que existe una distancia terrestre directa (d_{ij}) y una alternativa intermodal TMCD en la que la distancia marítima (d_m) que une los puertos de origen y destino es de 450 millas (equivalente al servicio Barcelona – Civitavecchia), con distintos porcentajes de acarreo. Se trata de simular relaciones TMCD incrementando el porcentaje de acarreo pero no la distancia terrestre que une el origen i y el destino final j de la mercancías transportadas.

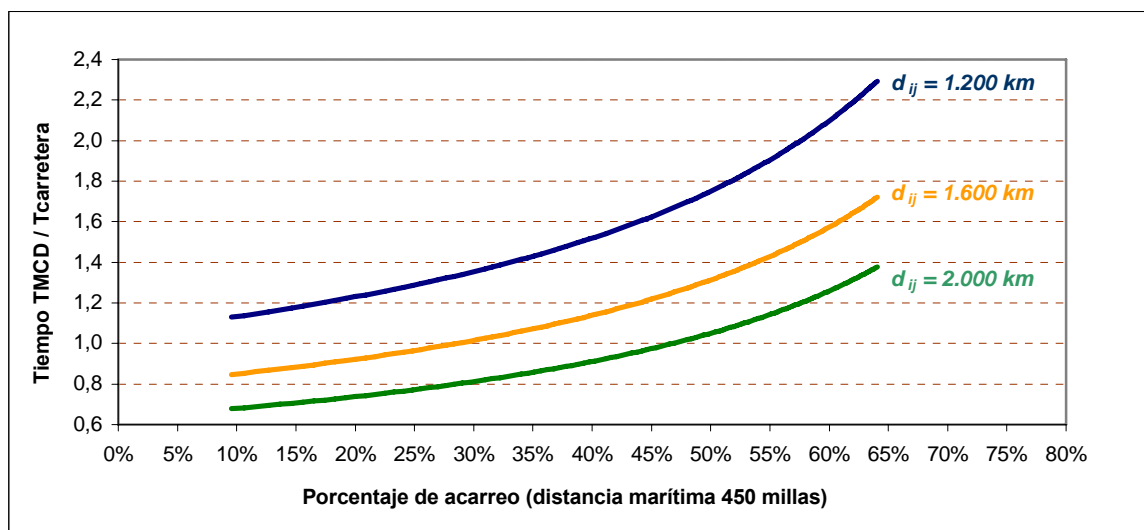


Figura 6-5. Relación entre el tiempo del TMCD y la carretera y el porcentaje de acarreo.

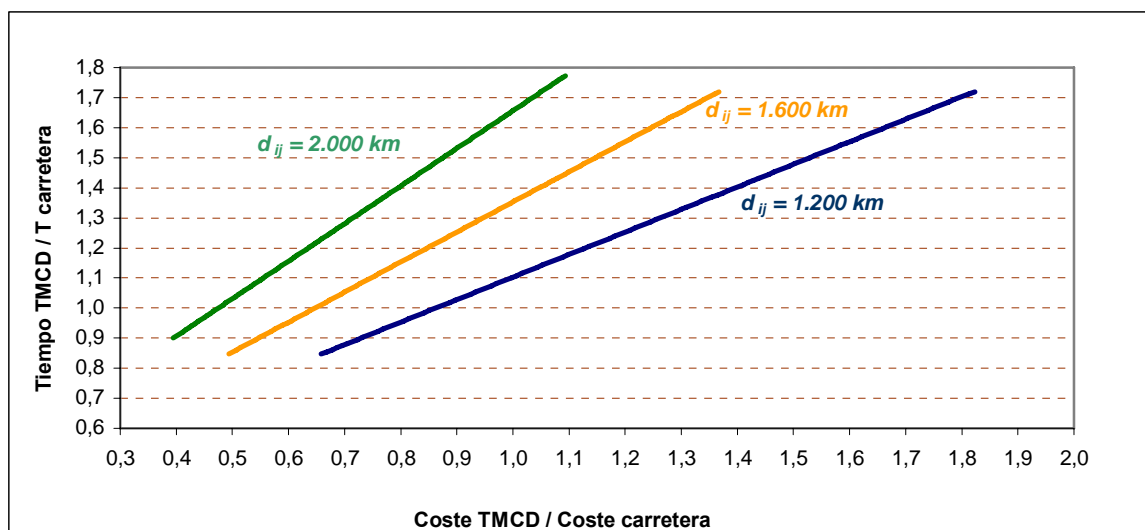


Figura 6-6. Relación entre el tiempo del TMCD y la carretera y sus costes.

El análisis realizado demuestra que la alternativa intermodal del TMCD es, en la gran mayoría de los casos, más lenta que su competidora terrestre. Para las relaciones en las que la distancia terrestre directa es de 1.200 km, el TMCD es siempre más lento, debido al importante porcentaje de tiempo destinado a la operativa portuaria (más de un 35% en todos los casos). Sin embargo, para las relaciones en las que la distancia directa terrestre es de 1.600 km y el porcentaje de acarreo total es inferior al 30%, la alternativa TMCD es competitiva en tiempos. Finalmente, para distancias terrestres directas de 2.000 km, el acarreo puede ser hasta de un 50% del total de distancia recorrida siendo el TMCD, en estos casos, más rápido que la carretera.

El análisis de costes y tiempo demuestra que siempre que el TMCD sea más rápido que la carretera, el coste de la alternativa intermodal es menor. Incluso, para el caso de 1.200 km, el TMCD puede ser un 10% más lento que la carretera, para el caso de 1.600 km, el TMCD puede ser un 35% más lento y, para el caso de 2.000 km, el TMCD puede ser hasta un 65% más lento que la carretera, siendo el TMCD, en todos estos casos, más competitivo en costes que la carretera.

Los casos analizados en las figuras anteriores, se han obtenido con un buque de 15.000 GT, con capacidad para albergar 130 plataformas, ocupación del 85% y una velocidad de 20 nudos. Este mismo análisis se ha realizado con buques que poseen velocidades mayores (24 nudos) pero los resultados obtenidos son muy parecidos. Esto se debe a que el tiempo destinado a la operativa portuaria es, sin duda, uno de los factores más importantes que afectan a la comparación de tiempos de los modos analizados. Para justificar esta afirmación se ha realizado un análisis consistente en evaluar la relación entre los tiempos de cada modo de transporte para distintas velocidades de buque y distintos porcentajes de acarreo.

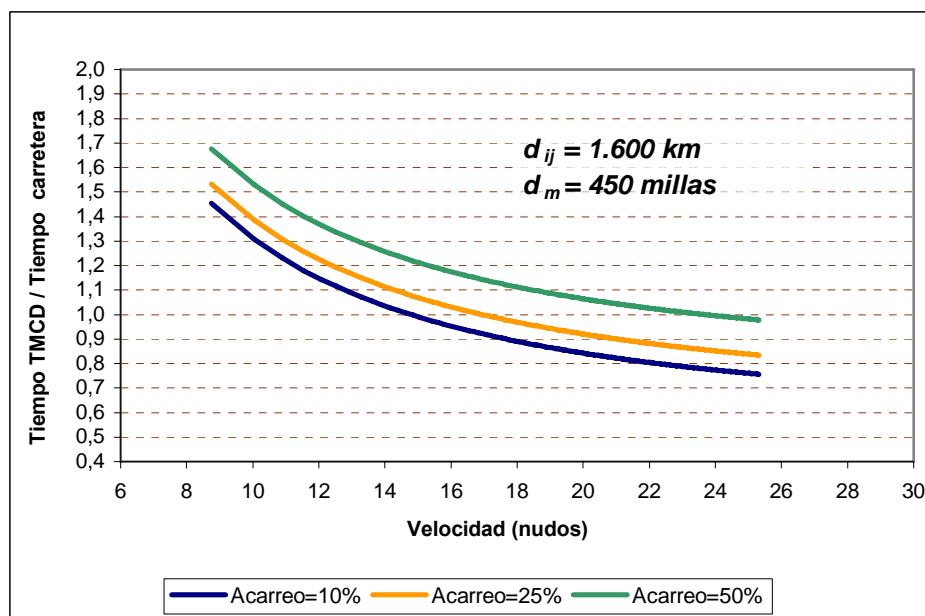


Figura 6-7. Relación de tiempos de cada modo y la velocidad del buque.

Como se observa en la Figura 6-7, para una distancia terrestre directa de 1.600 km y aquellas rutas en las que la distancia marítima es de 450 millas, a partir de velocidades de 17 nudos la alternativa intermodal es más rápida que la carretera si el acarreo es inferior al 25% del total de distancia recorrida. Además, aumentos de velocidad a partir de los 18 nudos no significan diferencias importantes si comparamos la relación entre tiempos de la alternativa intermodal con la puramente terrestre. Así, si para relaciones con un 25% de acarreo aumentamos la velocidad del buque hasta los 24 nudos (33,3%) la disminución de tiempo respecto al modo terrestre es de tan solo un 11,3%.

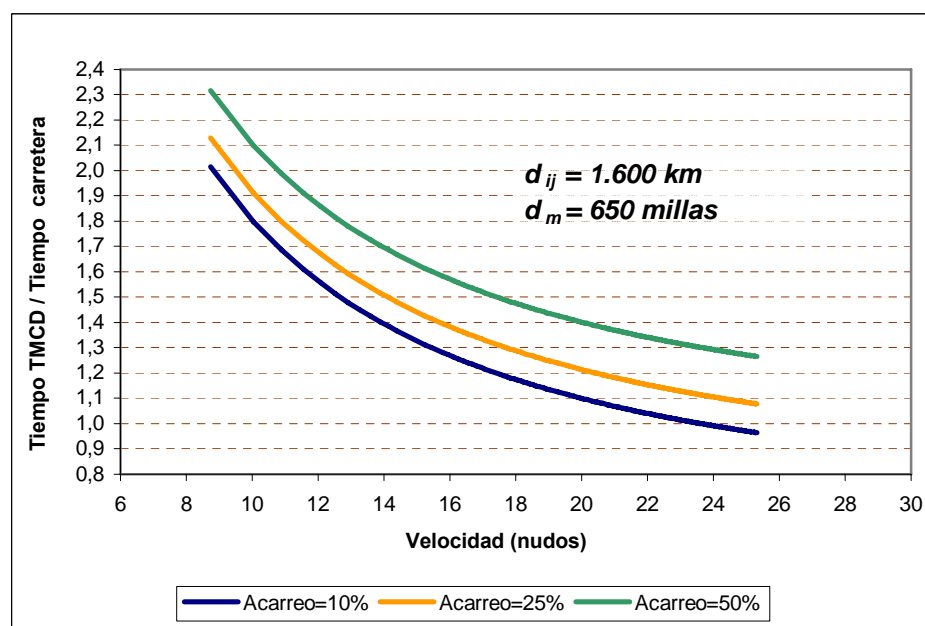


Figura 6-8. Relación de tiempos de cada modo y la velocidad del buque.

En la Figura 6-8 se ha analizado lo mismo que en el caso anterior pero se ha incrementado la distancia marítima hasta las 650 millas. En este caso, si aumentamos la velocidad del buque de 18 a 24 nudos, bajo un acarreo de un 25%, el diferencial de ahorro de tiempo del TMCD respecto la carretera es de un 14%. En cualquier caso, el TMCD en las condiciones analizadas es, salvo acarreos muy cortos del orden de un 10% del total de distancia de recorrido, más lento que el modo terrestre.

Los resultados obtenidos hasta el momento se han obtenido bajo la oferta actual de servicios TMCD en España. Por este motivo y de cara a evaluar la potencialidad futura del TMCD, se ha analizado como afectaría la variación de diversos parámetros que controlan el modelo considerando un aumento de la oferta de servicios TMCD en los puertos españoles y evaluando el impacto medioambiental de cada alternativa.

6.3.3 Potencialidad futura del TMCD

Para evaluar la potencialidad futura del TMCD se tomarán las relaciones España – Barcelona – Civitavecchia – Italia y España – Valencia – Salerno – Italia y se incrementará la oferta de servicios en todos los casos (manteniendo la demanda de transporte), analizando en cada caso como varía el reparto modal de mercancías y los costes del transporte para variaciones de distintos parámetros. El objetivo fundamental es obtener el techo de cuota de mercado que puede obtener el TMCD y evaluar su impacto medioambiental en los escenarios futuros 2010 y 2015.

6.3.3.1 Incremento de la oferta de servicios

La promoción del TMCD en el arco mediterráneo hace pensar que muchos operadores impulsarán la creación de nuevos servicios en los puertos seleccionados para este análisis (Barcelona y Valencia). Ambas Autoridades Portuarias han apostado por el TMCD, por lo que es plausible pensar en un incremento de la oferta de servicios TMCD como el que se indica en la Tabla 6-20. Todas las simulaciones se han realizado utilizando buques de 30.000 GT, con capacidad para albergar hasta 178 plataformas.

Puerto origen	Puerto destino	Número Buques W_h por semana		
		2007	2010	2015
Barcelona	Civitavecchia	6	15	20
Valencia	Salerno	3	10	20

Tabla 6-20. Incrementos de oferta de servicio propuesta. Buques de 30.000 GT.

En primer lugar, para el caso de las relaciones a través del puerto de Barcelona, se han analizado los escenarios futuros para las condiciones iniciales de la Tabla 5-10.

Situación	Concepto	2007		2010		2015	
		TMCD	Carretera	TMCD	Carretera	TMCD	Carretera
Solución	Cuota de mercado	30%	70%	63,4%	36,6%	63,4%	36,6%
X_{ij}	Costes kilométricos	0,822 €/km	0,977 €/km	0,931 €/km	0,977 €/km	1,062 €/km	0,977 €/km

Tabla 6-21. Resultados para los escenarios futuros en el puerto de Barcelona.

El algoritmo diseñado resuelve la solución para el 2010 con una ocupación del 85% mientras que para el 2015, la ocupación de los buques baja hasta el 62% con el incremento de costes para el TMCD que esto genera. Es muy interesante el resultado obtenido ya que el techo del TMCD en cuanto a reparto modal de distribución de mercancías se sitúa alrededor del 63% del total de plataformas de España a Italia, valor muy superior al 38% actual.

En la Tabla 6-22 se detallan los valores obtenidos para el puerto de Valencia en los escenarios futuros estudiados. En este caso se ha tenido que aumentar el parámetro de incremento de tiempo que la cadena TMCD puede ser más lenta que la carretera (Δt) hasta un 25%.

Situación	Concepto	2007		2010		2015	
		TMCD	Carretera	TMCD	Carretera	TMCD	Carretera
Solución	Cuota de mercado	9%	91%	41,5%	58,5%	47,4%	52,6%
X_{ij}	Costes kilométricos	0,812 €/km	0,977 €/km	0,847 €/km	0,977 €/km	0,891€/km	0,977 €/km

Tabla 6-22. Resultados para los escenarios futuros en el puerto de Valencia.

A la solución obtenida para el 2010 le corresponde una ocupación de los buques del 87% mientras que para el 2015, la ocupación de los buques baja hasta el 58%. Una vez más, el TMCD con la oferta futura de servicios sería el modo que más mercancía transportaría.

Como se desprende del análisis realizado, la ocupación de los buques para ambos puertos en el escenario 2015 es muy baja, con el incremento de costes que esto genera y partiendo de la base que, tal y como se ha indicado en el apartado 3.6.2, la capacidad del buque que optimiza costes es de 9.500 GT. Por este motivo se ha realizado de nuevo el mismo análisis, sólo para el caso de Barcelona, con la capacidad que optimiza costes (9.500 GT) e igualando la oferta de número de plataformas transportables con un incremento de buques en cada caso. Esta condición incrementa el número de buques disponibles en cada escenario e iguala la capacidad total de transporte con el caso anterior. Además, al aumentar el número de buques es plausible pensar que el parámetro que controla el beneficio de la naviera (δ) disminuirá al incrementar la competencia, por lo que en esta nueva simulación el beneficio de la naviera pasará de un 25% a un 18%.

Puerto origen	Puerto destino	Número Buques W_h por semana	
		2010	2015
Barcelona	Civitavecchia	25	34

Tabla 6-23. Incrementos de oferta de servicio propuesta. Buques de 9.500 GT.

Situación	Concepto	2010		2015	
		TMCD	Carretera	TMCD	Carretera
Solución X_{ij}	Cuota de mercado	64,6%	35,4%	65,6%	34,4%
	Costes kilométricos	0,921 €/km	0,977 €/km	0,931 €/km	0,977 €/km

Tabla 6-24. Resultados para los escenarios futuros en el puerto de Barcelona.

Como se observa en la Tabla 6-24, la cuota de mercado obtenida en los escenarios futuros 2010 y 2015 es ligeramente superior cuando los buques que operan en las líneas TMCD tienen un arqueado bruto de 9.500 GT. Esta situación de mercado aumenta el número de buques disponibles con lo que también aumenta el número de líneas que podrían unir el puerto de Barcelona con otros puertos en el arco mediterráneo. El único inconveniente que plantea esta situación futura es el incremento de emisiones perjudiciales para el medio ambiente, ya que a mayor número de buques mayor es el volumen de emisiones tóxicas, circunstancia que resta mucho atractivo a la situación planteada.

Precisamente en el último apartado de este estudio se compararán las emisiones de cada modo de transporte y su efecto sobre el medio ambiente

6.3.3.2 Efectos en el medio ambiente

En el consejo de ministros de transporte de la UE celebrado el 20 de enero de 2007 se llegó a la conclusión que “... *el TMCD es más eficiente en el uso de la energía y, en general, menos dañino para el medio ambiente que otros modos de transporte. Sin embargo, para mantener su positiva imagen y comportamiento medioambiental, deben perseguirse con urgencia mejoras en particular en las emisiones de óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas*”.

Según el *Informe sobre el cabotaje comunitario o transporte marítimo de corta distancia* (Ministerio de Fomento, 2002) en el conjunto del transporte la carretera genera más del 80% de las emisiones de CO₂, siendo, con diferencia, el modo más contaminante, mientras que el transporte marítimo se mantiene como el modo menos contaminante (0,479 gramos/tonelada-kilómetro de CO₂ por carretera, frente a 0,036 por TMCD, es decir, 13 veces menos).

Con estos datos y las situaciones futuras de transporte planteadas en el apartado 6.3.3.1 para el puerto de Barcelona se obtienen las emisiones semanales de cada modo de transporte en las relaciones España e Italia, que se recogen en la Tabla 6-25.

Situación	2007 (Actual)		2010		2015	
	TMCD	Carretera	TMCD	Carretera	TMCD	Carretera
Buques de 30.000 GT	1.809 (5%)	31.146 (95%)	3.896 (20%)	15.751 (80%)	3.956 (21%)	15.306 (79%)
	32.956		19.647 (↓ 40%)		19.262 (↓ 42%)	
Buques de 9.500 GT	1.780 (5%)	33.511 (95%)	3.833 (18%)	16.947 (82%)	3.892 (20%)	16.468 (80%)
	35.291		20.781 (↓ 41%)		20.361 (↓ 42%)	

Tabla 6-25. Emisiones de CO₂ de cada modo de transporte en los escenarios planteados. Datos en toneladas.
Fuente: Ministerio de Fomento, 2002.

El volumen total de emisiones con buques de 30.00 GT es un 7% inferior a las emisiones que se producen si los servicios TMCD se realizan mediante buques que optimizan el coste del transporte (buques de 9.500 GT). En cualquier caso, en todos los escenarios futuros las emisiones de CO₂ a la atmósfera terrestre disminuyen más de un 40% respecto a la situación actual, otra ventaja a la hora de aproximarse al objetivo de movilidad sostenible que propone la UE.

7 Conclusiones e investigaciones futuras

Las conclusiones de la tesina se refieren, en primer lugar, a las conclusiones más generales obtenidas en cada capítulo del estudio y, posteriormente, se proponen una serie de propuestas para investigaciones futuras relacionadas con el TMCD.

7.1 Conclusiones generales

El presente estudio ha intentado evaluar de forma cuantitativa, cualitativa y objetiva todos los aspectos relacionados con el Transporte Marítimo de Corta Distancia.

En primer lugar, la modelización de la estructura de tiempos y costes del TMCD ha permitido obtener funciones muy útiles que permiten determinar, según el arqueo bruto del buque o de la capacidad en número de plataformas del mismo, todos aquellos costes en los que incurre el transporte marítimo de corta distancia. Los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de estas funciones han sido muy satisfactorios, ya que la comparación del precio del flete de varios servicios TMCD con las funciones de coste propuestas ha permitido calibrar diversos parámetros de las mismas para su posterior implementación en el algoritmo heurístico desarrollado en la tesina.

El algoritmo diseñado para el análisis de rutas ofrece resultados muy esperanzadores para el TMCD en lo relacionado a los distintos escenarios planteados en materia de reparto modal de mercancías. En este sentido, la solución obtenida en los intercambios comerciales entre Catalunya e Italia demuestra que la actual cuota de mercado del TMCD, si bien concuerda con la solución obtenida en el modelo, está muy por debajo de la que realmente podría alcanzar ya que, en más del 90% de relaciones entre Catalunya e Italia, el TMCD consigue ahorros en términos de costes y tiempo respecto al modo unimodal terrestre. En consecuencia, se detecta un cierto déficit en la oferta de servicios de TMCD en las relaciones comerciales entre Catalunya e Italia, circunstancia que lastra el desarrollo de este modo de transporte intermodal de mercancías atendiendo a la privilegiada configuración geográfica de ambas regiones para el uso del TMCD.

Por otro lado, en el capítulo dedicado a la valoración de las variables que inciden en la cuota de mercado del TMCD, se ha demostrado que aquellos acarreo que representan menos del 60% del total de la distancia recorrida (incluyendo el tramo marítimo) son susceptibles de ser más económicos que la alternativa puramente terrestre. Desde la óptica del transportista terrestre, este umbral de distancia representaría que el transportista que realiza el acarreo en origen debería recorrer aproximadamente el 30% de la distancia total de transporte. De esta manera, para aquellos conductores usuarios de TMCD las distancias de transporte desde origen (el de las mercancías) a destino (en su caso, el puerto origen) se reducen, con lo que surge una oportunidad magnífica para conciliar su vida profesional con la privada, ya que disminuiría significativamente el número de noches fuera de su domicilio habitual.

Asimismo, se ha comprobado que la asignatura pendiente del TMCD es su tiempo de tránsito total. En este sentido, cualquier avance tecnológico que permita construir naves más rápidas y

que reduzca el tiempo dedicado a la operativa portuaria es imprescindible para superar con éxito el inconveniente de la lentitud del tramo marítimo de la cadena intermodal. Además, la gran cantidad de limitaciones del transporte terrestre como el aumento de la congestión de viaria, la imposibilidad de cruzar la frontera durante el fin de semana o la creciente atomización del sector, son factores que juegan a favor del desarrollo de la alternativa intermodal que representa el TMCD.

En el último capítulo, se ha podido comprobar que, bajo distintos escenarios futuros de incremento de la oferta de servicios del TMCD, la cuota de mercado del mismo podría pasar del 35% actual hasta más de un 60% del total de plataformas transportadas con origen en España. Asimismo, en relación al efecto sobre el medioambiente, en todos los escenarios futuros las emisiones de CO₂ a la atmósfera disminuyen más de un 40% respecto a la situación actual, otra ventaja a la hora de aproximarse al objetivo de movilidad sostenible que propone la UE. Por este motivo, y en aras de potenciar el TMCD en el futuro, los puertos españoles deberían incrementar en los próximos años sus esfuerzos y presupuestos en desarrollar específicamente este tipo de tráfico mediante terminales específicas de TMCD.

Cabe decir también que la integración del conjunto de eslabones de la cadena logística del TMCD es una necesidad y un factor clave para asegurar su éxito futuro. No basta que uno o varios de los componentes de la cadena mejoren su competitividad si no se preparan para su integración en la cadena del transporte intermodal. De no ser así, acabarán produciéndose los clásicos cuellos de botella que imposibilitarán alcanzar las cuotas de mercado futuras para el TMCD.

7.2 Investigaciones futuras

Finalmente, el autor desea que el presente estudio sirva como base para futuras investigaciones en el ámbito del transporte marítimo de mercancías. Más concretamente, las líneas de investigación futura podrían centrarse en:

- Desarrollo de modelos más complejos que incorporen estrategias de distribución tipo *many to many with transshipment* con el objetivo de que las terminales portuarias se conviertan en auténticas terminales de consolidación de mercancías.
- Incorporar variables estocásticas para definir la demanda de transporte de mercancías entre regiones.
- Ampliar el ámbito geográfico del modelo para poder analizar zonas más amplias como el arco mediterráneo o el arco atlántico en su totalidad.

El respeto por el medioambiente del transporte marítimo, en comparación con el terrestre, es un aspecto clave que en el futuro impulsará la redacción de estudios dedicados precisamente al análisis de la distribución modal de mercancías y la repercusión medioambiental de las distintas configuraciones de transporte posibles.

8 Referencias bibliográficas

Ahuja, R K, T L Magnanti y J R Orlin (1993) “Networks Flows Theory: Algorithms and Applications”. Prentice Hall, Englewood Cliff, pp. 846.

Baños-Pino, J., Coto-Millán, P. y Rodríguez-Álvarez, A. (1999) “Allocative efficiency and over-capitalization: an application”. *International Journal of Transport Economics*. Vol. 26, nº 2, pp. 181-199.

Bayraguet, A. (2003) “El port de Barcelona”. Aula Barcelona. Quaderns de gestió, p. 62.

Camarero, A. y Polo, G. (2005) “Ro-ro ships for short sea shipping”. *PIANC Magazine* nº 188. pp. 35-41.

Conforti, M. (1992) “Productivity scrutinized”. *7th Terminal Operations Conference*. Cristoforo Colombo Congress Center. Genoa, Italy, 16-18 de junio.

Cullinane, K. y Khanna, M (1998) “Economies of scale in Large Container Ships”. *Journal of transport economics and policy*. Vol. 33, Part 2 , pp. 185-208.

Daganzo, C. F. (1994) “Logistics systems analysis”. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, nº 361, segunda edición, Springer-Verlag, Berlín.

Debie, J y Guerrero, D. (2006) “Introducción a la lectura geográfica de un hinterland portuario: el ejemplo de Barcelona”. Instituto Nacional de Investigación sobre los Transportes (Arcueil, Francia). Boletín de la A.G.E. nº 42.

De Monie, G. (1989) “Medición y evaluación del rendimiento y de la productividad de los puertos”. Monografías de la UNCTAD sobre Gestión de Puertos. Nº 6, Nueva York.

Dowd, T.J. y Leschine, T. M. (1990) “Container terminal productivity: a perspective”. *Maritime Policy and Management*. Vol. 17, nº 2, pp. 107-112.

Fernández, J.E., De Cea, J. y Fernández, J.M. (1999) “Port privatization in developing countries: the case of container terminals”. *International Journal of Transport Economics*. Vol. 26, Nº2, págs. 292-313.

Forcadell y King Sturge (2005) “Barcelona en cifras”. Ajuntament de Barcelona. Publicacions electròniques.

Frías, Isidro (2002) “Modelización del transporte marítimo internacional”. Euro-American Association of Economic Development Studies Working Paper Series Economic Development Number 57.

González, M. y Trujillo, L. (2002) “Análisis de la eficiencia portuaria. Una revisión de la literature”. Mimeo.

- Hall, R.W. (1987)** "Comparison of strategies for routing shipments through transportation terminals". *Transportation Research*. 21A:6, pp. 421-429.AA
- Hall, R.W. (1989)** "Configuration of an overnight package air network". *Transportation Research*. 23A:2, pp. 139-149.
- Hooper, P.G. (1985)** "An essay on the measurement of productivity in ports". Unpublished Master Thesis, University of Tasmania, Hobart.
- Jansson, J.O. y Sheneerson, D. (1982)** "Port Economics". MIT Press, Massachusetts.
- Jansson, J.O. (1984)** "Transport system optimisation and pricing". New York. John Wiley and Sons.
- Jansson, J.O. y Sheneerson, D. (1988)** "A Model of Scheduled Liner Freight Services: Balancing Inventory Cost against Shipowners' costs". *The Logistics and Transportation Review*. Vol. 21-No. 3.
- Liu, Z. (1995)** "The comparative performance of public and private enterprises". *Journal of Transport Economics and Policy*. Septiembre, pp. 263-274.
- Maldonado Inocencio, José Luis (2000)** "La planificación portuaria I: análisis de la capacidad portuaria ligada a infraestructuras y equipamientos". TEMA Grupo Consultor.
- Martínez-Budría, E. (1996)** "Un estudio econométrico de los costes del sistema portuario español". *Revista Asturiana de Economía*. Vol. 6, pp. 135-149.
- Martínez de Osés, F. Xavier y Castells Sanabra, Marcel·la (2005)** "Análisis de los buques dedicados al transporte marítimo de corta distancia internacional en España". Grupo de investigación TRANSMAR. Departamento de Ciencias e Ingeniería Náuticas, UPC.
- Ministerio de Fomento (2001)** "Análisis, previsiones y contraste de tráfico para cada puerto y el conjunto del sistema portuario español para el año 2001 y los años horizontes 2004 y 2006. Informes sectoriales: Energético, Siderúrgico, Metalúrgico, Abonos, Químico, Materiales de la construcción, Agroganadero y Alimentario, Otras mercancías, Transportes especiales y Contenedores". Puertos del Estado.
- Ministerio de Fomento (2002)** "Informe sobre el cabotaje comunitario o transporte marítimo de corta distancia". Documento para el consejo informal de ministros de transportes de la Unión Europea a celebrar en Gijón en mayo-junio 2002. Propuestas de contenido.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gerencia del Sector Naval (2005)** "La construcción naval".
- Norwegian marine technology research institute (2003)**. Number 3rd June 2003.
- Polo, G., Camarero, A. y Pery, P (2003)** "El Transporte Marítimo de Corta Distancia como Alternativa de Transporte". *VI Congreso de Ingeniería del Transporte*. Vol 1, pp. 375-382.

Robusté, F. (1996) “Logística urbana”. Guión y apuntes no publicados de un curso de doctorado impartido en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja los días 25-29 de noviembre de 1996.

Robusté, F. (2005) “Logística del transporte”. Edicions UPC, Barcelona, pp. 60-61. ISBN: 84-8301-773-3.

Rodríguez Pérez, F. (1985) “Dirección y Explotación de Puertos”. Puerto Autónomo de Bilbao.

Roll, Y. y Hayuth, Y. (1993) “Port performance comparison applying data envelopment analysis (DEA)”. *Maritime Policy and Management*. Vol. 20, Nº 2, pp. 153-161.

Rúa Costa, Carles (2006) “Los servicios portuarios”. EOLI IOC-DT-P-2006-22. Desechos

Shneerson, D. (1981) “Investment in port systems”. A case study of the Nigerian ports”. *Journal of Transport Economics and Policy*. Vol. 15, Nº3, pp. 201-216.

Shneerson, D. (1983) “Short term planning for a ports system”. *Maritime Policy and Management*. Vol. 10, Nº4, pp. 217-250.

Subirana, J. (2005) “És el short sea shipping rentable per a l’armador?” Facultad de Náutica de Barcelona.

Talley, W.K. (1994) “Performance indicators and port performance evaluation”. *Logistics and Transportation Review*. Vol. 30, Nº 4, pp.339-352.

Tongzon, J.L. (1993) “The Port of Melbourne Authority’s pricing policy: its efficiency and distribution implications”. *Maritime Policy and Management*. Vol. 20, Nº3, pp. 197-203.

Anejo 1. Código del programa VBA

En las siguientes páginas se puede consultar el código para la formulación del algoritmo diseñado para la resolución del problema *many to many* y diferentes procesos seguidos para el análisis de sensibilidad.

```
Sub Sensibilidad_TMCD()

Dim i As Long
Dim fila As Integer
Dim GTf As Long
Dim GT As Single

GTf = Worksheets("Funciones_coste").Cells(29, 2).Value

fila = 30

For i = 1 To CLng(GTf)

    GT = i

    Worksheets("Funciones_coste").Cells(3, 2).Value = GT

    CTMCD = Worksheets("Funciones_coste").Cells(7, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 3).Value = CTMCD

    CACARR = Worksheets("Funciones_coste").Cells(10, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 4).Value = CACARR

    Cooperativa = Worksheets("Funciones_coste").Cells(11, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 5).Value = Cooperativa

    Cmarítimo = Worksheets("Funciones_coste").Cells(12, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 6).Value = Cmarítimo

    TiempoTMCD = Worksheets("Funciones_coste").Cells(8, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 7).Value = TiempoTMCD

    Tiempocarr = Worksheets("Funciones_coste").Cells(5, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 8).Value = Tiempocarr

    Ccarr = Worksheets("Funciones_coste").Cells(4, 14).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 9).Value = Ccarr

    Ccap = Worksheets("Funciones_coste").Cells(20, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 10).Value = Ccap

    Crep = Worksheets("Funciones_coste").Cells(21, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 11).Value = Crep

    Ctrip = Worksheets("Funciones_coste").Cells(22, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 12).Value = Ctrip

    Ccom = Worksheets("Funciones_coste").Cells(23, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 13).Value = Ccom

    Ctas = Worksheets("Funciones_coste").Cells(24, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 14).Value = Ctas

    Cinv = Worksheets("Funciones_coste").Cells(25, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 15).Value = Cinv

    Cppb = Worksheets("Funciones_coste").Cells(26, 11).Value
    Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 16).Value = Cppb
```

```
GT = Worksheets("Funciones_coste").Cells(3, 2).Value
Worksheets("Funciones_coste").Cells(fila, 2).Value = GT

fila = fila + 1

i = i + 250

Next i

End Sub

Sub BorrarTodos()

Worksheets("Funciones_coste").Select

Worksheets("Funciones_coste").Range(Cells(30, 2), Cells(1000, 16)).Select
Selection.ClearContents

End Sub

Sub TMCD()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim dijsup As Long
Dim dihsup As Long
Dim dhjsup As Long
Dim dmsup As Long
Dim fila As Integer

fila = 10

i = 1
j = 1

For i = 1 To 10

    For j = 1 To 10

        dijsup = Worksheets("dij").Cells(i, j).Value      'Calculo del coste terrestre
        Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 2).Value = dijsup 'almacenado en Xij

        CC = Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 14).Value
        Worksheets("Xij").Cells(fila + i, j).Value = CC

        dijsup = Worksheets("dij").Cells(i, j).Value
        Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 2).Value = dijsup

        CC = Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 14).Value
        Worksheets("Xij").Cells(fila + i, j).Value = CC

        dihsup = Worksheets("dih").Cells(i, j).Value      'Calculo del coste de acarreo en dih
        Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 2).Value = dihsup 'almacenado en Xij

        Cdih = Worksheets("funciones_coste").Cells(14, 14).Value
        Worksheets("Xij").Cells(fila + 10 + i, j).Value = Cdih

        dihsup = Worksheets("dih").Cells(i, j).Value
        Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 2).Value = dihsup

        Cdih = Worksheets("funciones_coste").Cells(14, 14).Value
```

```
Worksheets("Xij").Cells(fila + 10 + i, j).Value = CdiH

dhjsup = Worksheets("dhj").Cells(i, j).Value      'Calculo del coste de acarreo en dhj
Worksheets("funciones_coste").Cells(6, 2).Value = dhjsup 'almacenado en Xij

Cdhj = Worksheets("funciones_coste").Cells(15, 14).Value
Worksheets("Xij").Cells(fila + 20 + i, j).Value = Cdhj

dhjsup = Worksheets("dhj").Cells(i, j).Value
Worksheets("funciones_coste").Cells(6, 2).Value = dhjsup

Cdhj = Worksheets("funciones_coste").Cells(15, 14).Value
Worksheets("Xij").Cells(fila + 20 + i, j).Value = Cdhj

dmsup = Worksheets("dm").Cells(i, j).Value      'Calculo del coste de tramo marítimo
Worksheets("funciones_coste").Cells(7, 2).Value = dmsup 'almacenado en Xij

Cmj = Worksheets("funciones_coste").Cells(12, 14).Value
Worksheets("Xij").Cells(fila + 30 + i, j).Value = Cmj

dhjsup = Worksheets("dm").Cells(i, j).Value
Worksheets("funciones_coste").Cells(7, 2).Value = dmsup

Cmj = Worksheets("funciones_coste").Cells(12, 14).Value
Worksheets("Xij").Cells(fila + 30 + i, j).Value = Cmj

    'Calculo del coste de la operativa portuaria
    'almacenado en Xij en Excel celdas

Next j

Next i

End Sub

Sub BorrarTmcd()

Worksheets("Xij").Select

Worksheets("Xij").Range(Cells(11, 1), Cells(50, 10)).Select
Selection.ClearContents

End Sub

Sub Montarbuque()

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim fila As Integer
Dim wih As Integer
Dim w As Integer
Dim wmax As Integer

i = 1
j = 1
fila = 16

For i = 1 To 10
```

```
For j = 1 To 10

w = Worksheets("wih").Cells(i, j).Value

If w > wmax Then

wmax = w

Worksheets("wih").Cells(fila + i, j).Value = wmax 'Almaceno wmax para montar buque

End If

wmax = Worksheets("wih").Cells(fila + i, j).Value = wmax

Next j

Next i

End Sub

Sub Tiemposc()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim wijsup As Long
Dim dijsup As Long
Dim fila As Integer

filawcor = 11
fila = 1

i = 1
j = 1

For i = 1 To 10

For j = 1 To 10

wijsup = Worksheets("wij").Cells(i + filawcor, j).Value

If wijsup > 0 Then

dijsup = Worksheets("dij").Cells(i, j).Value 'Calculo del tiempo terrestre
Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 2).Value = dijsup 'almacenado en Tiempos

tjjsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 8).Value
Worksheets("tiempos").Cells(i, j).Value = tjjsup

End If

fila = fila + 1

Next j

Next i

End Sub

Sub Tiempostmcd()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
```

```
Dim wihsup As Long
Dim dijtotalsup As Long
Dim dihx As Long
Dim dhjx As Long
Dim dmx As Long
Dim tijm As Long
Dim fila As Integer

filawihcor = 16
fila = 1

i = 1
j = 1

For i = 1 To 10

    For j = 1 To 10

        wihsup = Worksheets("wih").Cells(i + filawihcor, j).Value

        If wihsup > 0 Then

            dihx = Worksheets("dih").Cells(i, j).Value
            Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 2).Value = dihx

            tihsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(9, 8).Value
            Worksheets("tiempos").Cells(i + 12, j).Value = tihsup

            dhjx = Worksheets("dhj").Cells(i, j).Value
            Worksheets("funciones_coste").Cells(6, 2).Value = dhjx

            topm = Worksheets("funciones_coste").Cells(18, 8).Value
            Worksheets("tiempos").Cells(i + 12, j).Value = topm

            tmm = Worksheets("funciones_coste").Cells(27, 8).Value
            Worksheets("tiempos").Cells(i + 12, j).Value = tmm

            thjsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(13, 8).Value
            Worksheets("tiempos").Cells(i + 12, j).Value = thjsup + tihsup + topm + tmm

        End If

        fila = fila + 1

    Next j

Next i

End Sub

Sub TiemposIltmcd()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim wihsup As Long
Dim dijtotalsup As Long
Dim dihx As Long
Dim dhjx As Long
Dim dmx As Long
Dim tijm As Long
Dim fila As Integer
```

```
filawihcor = 16
fila = 1

i = 1
j = 1

For i = 1 To 10

    For j = 1 To 10

        dihx = Worksheets("dih").Cells(i, j).Value
        Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 2).Value = dihx

        tihsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(9, 8).Value
        Worksheets("tiemposII").Cells(i + 12, j).Value = tihsup

        dhjx = Worksheets("dhj").Cells(i, j).Value
        Worksheets("funciones_coste").Cells(6, 2).Value = dhjx

        topm = Worksheets("funciones_coste").Cells(18, 8).Value
        Worksheets("tiemposII").Cells(i + 12, j).Value = topm

        tmm = Worksheets("funciones_coste").Cells(27, 8).Value
        Worksheets("tiemposII").Cells(i + 12, j).Value = tmm

        thjsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(13, 8).Value
        Worksheets("tiemposII").Cells(i + 12, j).Value = thjsup + tihsup + topm + tmm

        fila = fila + 1

    Next j

Next i

End Sub

Sub TiemposcII()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim wijsup As Long
Dim dijsup As Long
Dim fila As Integer

filawcor = 11
fila = 1

i = 1
j = 1

For i = 1 To 10

    For j = 1 To 10

        wijsup = Worksheets("wij").Cells(i + filawcor, j).Value

        dijsup = Worksheets("dij").Cells(i, j).Value      'Calculo del tiempo terrestre
        Worksheets("funciones_coste").Cells(4, 2).Value = dijsup 'almacenado en Tiempos sin restricción
```



```
tijsup = Worksheets("funciones_coste").Cells(5, 8).Value
Worksheets("tiemposII").Cells(i, j).Value = tijsup

fila = fila + 1

Next j

Next i

End Sub

Sub BorrarTiempos()

Worksheets("tiempos").Select

Worksheets("tiempos").Range(Cells(1, 1), Cells(22, 10)).Select
Selection.ClearContents

End Sub

Sub BorrarTiemposII()

Worksheets("tiemposII").Select

Worksheets("tiemposII").Range(Cells(1, 1), Cells(22, 10)).Select
Selection.ClearContents

End Sub

Sub GlobalTMCD()

End Sub
```

Anejo 2. Buques utilizados en el análisis

En la siguiente tabla se adjunta toda la información relativa a los buques utilizados en el presente estudio. Las fuentes de información empleadas son las siguientes:

- **Martínez de Osés, F. Xavier y Castells Sanabra, Marcel·la (2005)** “Análisis de los buques dedicados al transporte marítimo de corta distancia internacional en España”. Grupo de investigación TRANSMAR. Departamento de Ciencias e Ingeniería Náuticas, UPC.
- Páginas web: **www.equasis.org** y **www.genaval.org**.

Nombre buque	Año construcción	Potencia (KW)	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Arqueo bruto (GT)
Malta Express	n/d	10500	126,5	21,0	5,9	11457
Eurostar Valencia	2003	18900	186,5	25,6	6,8	25984
Eurostar Salerno	2003	18900	186,5	25,6	6,8	25995
Eurostar Roma	1995	31680	173,7	24,0	6,4	23663
Eurostar Barcelona	2001	50400	211,9	25,0	6,8	30860
Bouzas	2002	12960	141,25	21,0	6,0	15224
L'Audace	n/d	11540	141,25	21,0	6,0	15224
Galicia	2003	15000	149,38	21,0	5,9	16361
La Surprise		12960	141,25	21,0	6,0	15222
Suar Vigo	2002	18000	149,8	21,0	5,9	16361
Gran Canaria Car	2001	8960	132,45	21,2	5,2	9800
Tenerife Car	2002	9600	132,8	21,2	5,2	13112
Cervantes	1992	9800	138	21,5	6,7	15575
Velazquez	1992	9800	138	21,5	6,7	16021
Arroyofrio dos	1985	7900	107,9	18,4	6,5	8126
Arroyofrio uno	1984	7980	107,9	18,4	6,5	8126
Sieltor	1999	11000	116,1	16,6	6,1	5025
Gemma B	n/d	12000	165,5	23,1	10,1	13769
Montserrat B	1980	8500	176,7	25,3	10,0	16712
Fantastic	1996	25920	187,8	28,0	6,8	35186
Fortuny	2001	28960	157	26,2	6,2	26916
Norse Mersey	1995	8145	174,5	24,4	7,5	16009
Mira J	n/d	8945	125,5	19,4	7,3	6393

Nombre buque	Año construcción	Potencia (KW)	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Arqueo bruto (GT)
Alexandra	n/d	6400	75,16	20,2	8,3	2245
Rheintal	1996	8642	93,37	16,5	5,9	3824
Sven Oltman	n/d	10256	108,77	17,9	6,6	5006
Don Carlos	n/d	12000	118,7	18,8	6,8	7955
Gerdia	1994	8900	108,78	17,9	6,6	5026
EuroCargo Valencia	1999	12510	178,5	25,2	8,6	20883
Setubal Express	n/d	153	23,8	9,8	17,0	16383
Salerno Express	n/d	140	19,2	6,8	16,0	8414